

СОДЕРЖАНИЕ

Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я. Поточная термическая обработка сортового и фасонного проката.....	5
Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., Койнов Т.А. Разработка и моделирование усовершенствованного совмещенного процесса «прокатка-равноканальное угловое прессование».....	25
Колмогоров Г.Л., Акулова А.А. Прочность и предельная несущая способность трубобетонных колонн.....	29
Босикова Е.Ю., Полякова М.А., Барышников М.П. Технические решения по совершенствованию конструкции порошковой проволоки для улучшения ее технологических свойств.....	33
Малаканов С.А., Железков О.С., Арзамасцева В.А. Моделирование процесса предварительной высадки головки болта.....	39
Шубин И.Г., Шубина Н.И. К вопросу конструирования канатов с учетом их механических и эксплуатационных характеристик.....	41
Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н., Железков О.С. Исследование технологии ускоренного охлаждения катанки на проволочном стане.....	45
Железков О.С., Мухаметзянов И.Д., Барышников М.П., Малаканов С.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов исследования процесса волочения проволоки трапецевидного сечения в монолитной волоке.....	48
Голубчик Э.М., Тарасов П.П. Оценка влияния химического состава на механические свойства металлопроката из высокопрочных двухфазных микролегированных сталей.....	51
Ширяев О.П., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г. Особенности применения интервальной математики при управлении качеством продукции в технологиях метизного производства.....	57
Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Исследование модульно-комбинированного процесса волочения углеродистой проволоки по схеме «квадрат-круг».....	61
Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. Потенциодинамические исследования сплава АЖ 4.5, легированного свинцом в среде электролита NaCl.....	64
Самодурова М.Н., Барков Л.А., Латфулина Ю.С. Исследования процессов высокоскоростного формования порошков на основе графита.....	68
Рефераты.....	75
Reports.....	79
Сведения об авторах.....	82
The information about the authors.....	84

CONTENTS

Sychkov A.B., Sheksheyev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ya. Heat treatment in the production stream of round, of rebars and section rolled.....	5
Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Koinov T.A. Development and simulation of advanced combined process "rolling - equal channel angular pressing".....	25
Kolmogorov G.L., Akulova A.A. The strength and the ultimate bearing capacity of pipe-concrete columns.....	29
Bosikova E.Yu., Polyakova M.A., Baryshnikov M.P. Technical decisions for powdered wire construction development for its technological properties improvement.....	33
Malakanov S.A., Zhelezkov O.S., Arzamasceva V.A. Modeling the process of pre-stamping the bolt head.....	39
Shubin I.G., Shubina N.I. About the constructing of ropes with regard to their mechanical and operational characteristics.....	41
Platov S.I., Nekit V.A., Ogarkov N.N., Zhelezkov O.S. Accelerated cooling of wire rods after hot rolling.....	45
Zhelezkov O.S., Mukhametzyanov I.Sh., Baryshnikov M.P., Malakanov S.A. Comparative analysis theoretical and experimental results research process wire drawing trapezoidal in the monolitnic portage.....	48
Golubchik E.M., Tarasov P.S. Evaluation of the influence of chemical composition on mechanical properties of rolled metal of high strength microalloyed forging steels in two-phase.....	51
Shiryev O.P., Korchunov A.G., Pivovarova K.G. Peculiarities of application the interval mathematics at product quality management in metal ware technologies.....	57
Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. Investigation the carbon steel wire module and combined drawing process due to scheme "square-circle".....	61
Odinaev F.R., Ganiev I.N., Safarov A.G., Yakubov U.Sh. Potentiodynamic studies of alloys potentiodynamic study of 4,5 alloy doped plumbum in medium electrolyte NaCl.....	64
Samodurova M.N., Barkov L.A., Latfulina Yu.S. Investigation of high velocity compaction processes of powder on base of graphite.....	68
Рефераты.....	75
Reports.....	79
Сведения об авторах.....	82
The information about the authors.....	84

ПОТОЧНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СОРТОВОГО И ФАСОННОГО ПРОКАТА

Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я.

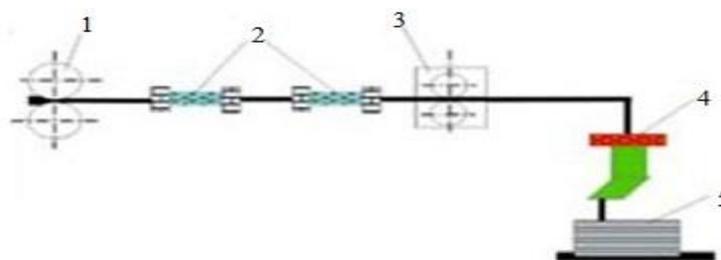
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Роль термической и термомеханической обработки в процессе формирования структуры и свойств металлов трудно переоценить. В настоящей статье рассматривается технология и оборудование для термической обработки сортового проката в прутках мерной длины и бунтах, а также фасонных профилей, проводимой с использованием тепла преддеформационного нагрева по схеме прерванной или прерывистой (режим термоциклирования) закалки с самоотпуском. Указанный технологический режим термической обработки, осуществляемый в потоке производства без использования отдельного нагрева, является перспективным экономически эффективным процессом.

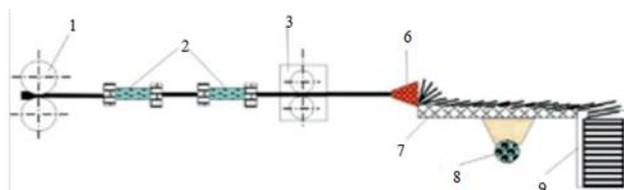
Технология термической обработки катанки

Ниже рассмотрены конкретные примеры термической обработки марко - профила размеров сортового проката по традиционной технологии и современной технологии на линиях типа Stelmor. Для этого приведем характеристику этих линий [1-3].

Исторически при производстве катанки и проката в бунтах сначала задача термического воздействия на производимый металл сводилась к снижению потерь металла в воздушную окалину. Поэтому достаточно было применения одностадийного водяного охлаждения (рис. 1, а). С развитием производства проката в бунтах более сложного назначения из стали широкого марочного состава, появилась необходимость в проведении поточной термомеханической обработки катанки и проката в бунтах с использованием теплоты прокатного нагрева. Эта непрерывная обработка имеет преимущества перед термообработкой металла с отдельного нагрева: сокращение технологического цикла производства металлопродукции и затрат со снижением расхода тепло – электроэнергии, получением уникального комплекса структур и свойств проката за счет термомеханического эффекта такой обработки. В 50-ых годах 20 века канадской фирмой «Steelco» и американской фирмой «Morgan» был разработан универсальный технологический процесс и создано оборудование для его осуществления, получившие названия «Stelmor» (рис. 1, б) [4, 5].



а) одностадийное охлаждение на линии Stelmor



б) двустадийное охлаждение на линии Stelmor

Рис. 1. Устройства для ускоренного охлаждения катанки:
 1 – последняя клеть стана; 2 – водяное охлаждающее устройство;
 3 – трайб-аппарат; 4 – моталка; 5 – бунт катанки;
 6 – виткообразователь; 7 – транспортер витков;
 8 – вентилятор; 9 – шахта виткосборника

Для охлаждения катанки из различных марок сталей были созданы различные модификации способа Stelmor. При производстве катанки из средне- и высокоуглеродистых сталей, например, для производства

канатов, применяется стандартный Stelmor. Для производства катанки из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей (стали для производства сварочной проволоки, клапанных пружин, подшипниковые стали и др.) используют «замедленный Stelmor». Был разработан также процесс «медленный Stelmor», который получил широкое распространение, позволяющий создавать требуемые условия воздушного охлаждения со скоростью от 0,5 до 25 °С/с при производстве катанки широкого марочного сортамента [3, 6-8].

Линия Stelmor имеет широкое применение на постсоветском пространстве и в дальнем зарубежье, благодаря ряду преимуществ: возможность проведения высокоскоростной и замедленной прокатки, достижение требуемой структуры и свойств металла при охлаждении с прокатного нагрева. Отличительной особенностью линии Stelmor от других термических агрегатов является то, что на данной линии возможно производство катанки широкого марочного состава и диаметра, в том числе и арматурного проката, благодаря широкому варьированию интенсивности охлаждения на водяном и воздушном участке, применения теплоизолирующего тоннеля.

Существуют несколько конструктивных типов линии Stelmor, когда используется двух-, трех-, четырехэтажный рольганг над участком воздушного охлаждения. Данное технологическое решение применяется для искусственного увеличения протяженности линии по типу «длинный Stelmor» из-за малой длины и площади цеха [9].

Технология термомеханической обработки сортового проката на линии Stelmor, применяемая на большинстве современных проволочных станах, включает форсуночное охлаждение катанки водой после выхода из чистового блока (1-я стадия) и интенсивное воздушное охлаждение с помощью вентиляторов витков, разложенных под транспортером витков (2-я стадия), затем – на спокойном воздухе или под теплоизолирующими крышками [10].

При помощи термообработки достигают требуемые уровни микроструктуры и механических свойств, обеспечивающие удовлетворительную технологичность проката при дальнейшей переработке. При помощи регулируемого охлаждения управляют фазовым составом окалины, обеспечивающим как ее полное удаление с поверхности проката (теми или иными способами: химическим, механическим, комбинированными и т.п.), так и предотвращение коррозии поверхности металла в процессе его транспортировки и хранения [2, 3, 6, 7, 11-15].

Технология и оборудование для термообработки катанки в потоке стана

Применяющиеся в настоящее время способы регулируемого охлаждения катанки можно разделить на пять групп: охлаждение водой в проводящих трубах; двустадийное охлаждение катанки на линии типа Stelmor; охлаждение в ванне с подогретой водой и ПАВ; охлаждение в воде и псевдосжиженном слое; другие способы охлаждения. Рассмотрим некоторые из них.

Наибольшее распространение получили процессы типа Stelmor – двустадийное охлаждение катанки. Конструкция линии Stelmor позволяет осуществлять следующие способы воздушного охлаждения металла.

1. Замедленное термостатирование катанки под теплоизолирующими крышками с минимально-достижимой скоростью охлаждения. Позволяет получить равномерную крупнозернистую рекристаллизованную структуру, предназначенную для дальнейшего глубокого волочения без применения операций отжига.

2. Ускоренное воздушное охлаждение катанки струями воздуха, подаваемыми на витки катанки при помощи вентиляторных установок. Термоизолирующие крышки открыты. Применяется обычно для высокоуглеродистых марок стали для получения структур мелко-дисперсного сорбитообразного перлита.

3. Охлаждение катанки на естественном воздухе. Термо-изолирующие крышки открыты. Вентиляторные установки выключены. Применяется для углеродистых марок обыкновенного качества, предназначенных для армирования бетона и производства строительных конструкций. Позволяет получить мелкое нормализованное зерно, сочетающее высокие прочностные и пластичные характеристики.

В зависимости от сортамента и назначения производимой катанки оборудование линии Stelmor различается длиной линии замедленного охлаждения (длина участка линии, закрываемая теплоизолирующими крышками) и мощностью и конструкцией вентиляторов.

Охлаждение в ванне с подогретой водой и ПАВ

Добавки ПАВ в воду предназначены для уменьшения или увеличения теплосъема с поверхности охлаждаемого металла. Температура воды, в которую добавляют ПАВ, может находиться в пределах 20-80 °С. ПАВ, введенные в воду, позволяют повысить стабильность паровой рубашки, через которую осуществляется теплоперенос между металлом и охлаждающей жидкостью. Так как теплопроводность паровой пленки довольно низкая, то ее наличие позволяет снижать и управлять скоростью охлаждения металла. Известные процессы регулируемого охлаждения катанки – ЕД или ЕДС – включают в качестве технологических операций предварительное охлаждение раската водой по выходу из последней клетки стана и окончательное охлаждение в баке с горячей водой, содержащей добавки ПАВ. В качестве ПАВ применяются катионные и анионные активирующие вещества, эфиры, многоатомные спирты и жирные кислоты. В других разработках при

применении в качестве ПАВ соли CaCl_2 или смеси солей $\text{NaCl}+\text{KCl}$ улучшение теплоотвода достигается созданием вокруг катанки электрического поля [15].

Охлаждение в воде и псевдосжиженном слое

Этот способ применяется в основном для сталей, содержащих 0,40-0,85 % углерода, с целью получения сорбитной структуры. Превращению аустенита в сорбитообразный перлит способствуют следующие технологические факторы: быстрое переохлаждение аустенита до необходимого температурного интервала и высокая изотермичность процесса в псевдосжиженном слое. Скорость охлаждения катанки в кипящем слое можно регулировать изменением размера и материала частиц, изменением скорости псевдосжиженного агента, изменением температуры кипящего слоя. Охлаждающую способность кипящего слоя можно также регулировать путем изменения степени его увлажнения.

Другие способы охлаждения

Наряду с перечисленными способами, характерной особенностью которых является обработка катанки за последней клетью стана, был разработан способ сорбитизации катанки, включающий предварительное подстуживание раската в чистой группе клетей и окончательное охлаждение до 500-650 °С после деформации не менее, чем на 10-15 % по отношению к подстуженному сечению.

Другой способ разработан фирмой Schloemann, согласно которому патентирование катанки после горячей прокатки производят поочередным охлаждением с выравниванием температуры перед превращением. При этом закалочные стадии логарифмически снижаются, а стадии выравнивания логарифмически увеличиваются. Поверхность катанки охлаждают ниже 400 °С, и превращение в перлитной области начинается перед полным выравниванием температуры.

Согласно патенту Великобритании [16] горячекатаную катанку пропускают через водоохлаждающее устройство на вращающуюся трубчатую моталку, после чего катанка поступает в соляную ванну.

Вышеуказанный способ усовершенствовали японские инженеры. Это так называемый DLP-процесс [17], патентирование катанки в растворах солей в технологическом потоке производства катанки (рис. 2). Катанка, уложенная виткоукладчиком в форме спирали, после выдержки в печи для выравнивания температуры погружается в емкость с солью. Затем после охлаждения катанка промывается в линии очистки.

Различие в применяемых технологических операциях не приводит к существенному изменению качества катанки и проволоки, поэтому при выборе наиболее рациональной технологии регулируемого охлаждения катанки применительно к конкретному производству необходимо руководствоваться экономическими критериями – обеспечение требований заказчика с минимальными затратами.

На современных станах применяют разные системы для регулирования количества воздуха по ширине транспортера, однако большинство этих систем дают возможность изменить количество воздуха только в центральных и крайних зонах, т.е. осуществляется грубая регулировка с малым числом зон, что недостаточно для обеспечения условия равномерного охлаждения. В Японии применяют способ ККР [18], заключающийся в том, что в крайних зонах транспортера устанавливают дополнительную систему заслонок, что позволяет более дифференцированно изменять воздушный поток, подаваемый в места с наиболее плотной укладкой (рис. 3).

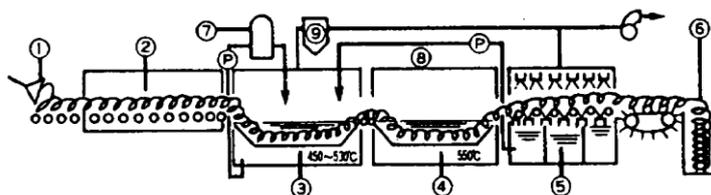


Рис. 2. Схема DLP-процесса:

- Р - насос; 1 – виткоукладчик;
- 2 – печь для выравнивания температуры; 3, 4 – соляные ванны;
- 3 - № 1 (температура - 455 - 530 °С) и 4 - № 2 (температура - 550 °С);
- 5 – участок струйной очистки катанки; 6 – виткосборник;
- 7 – охлаждение соляной ванны;
- 8 – регенерация соли из промывочной воды;
- 9 – вентиляционная система

Рассмотрим подробнее вышеуказанные требования к качеству катанки.

Дисперсность перлита, размер его колоний и однородность распределения по сечению катанки в этом отношении играет важную роль. Структура мелкодисперсного или сорбитообразного перлита является

наиболее благоприятной для достижения высоких суммарных обжатий при производстве проволоки [2, 3, 8, 15, 19, 20].

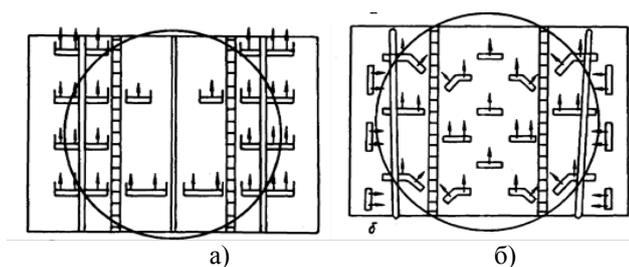


Рис. 3. Схемы охлаждения катанки:
а) обычного; б) по способу ККР

Структура мелкодисперсного перлита, наряду с высокой прочностью обладает значительным запасом пластичности. Наличие в сечении катанки мелкодисперсного перлита не менее 50 % позволяет достигнуть при волочении такой катанки из стали с содержанием углерода 0,70-0,80 % суммарной степени деформации 90 % без применения специальной термообработки. Получение же в структуре катанки грубопластинчатого перлита, в случае отсутствия специального интенсивного воздушного охлаждения, существенно снижает ресурс пластичности. Карбиды грубопластинчатой структуры в процессе холодной деформации начинают дробиться при обжатиях около 20 %. При степени деформации около 60 % грубопластинчатый цементит раздробляется настолько, что приобретает форму коротких пластинок, напоминающих в целом структуру зернистых карбидов.

В структуре обнаруживаются срезы (сколы), плоскость которых составляет с плоскостью прокатки угол 45°.

Кроме того, структура мелкодисперсного перлита является более температуроустойчивой, чем грубопластинчатого перлита. Это является существенным фактором, с точки зрения образования мартенсита в поверхностных слоях проволоки, в случае местных разогревов проволоки из-за плохого захвата смазки или транспортных операций.

Наряду с дисперсностью перлита на деформируемость катанки оказывает влияние и размер действительного зерна. Для высокоуглеродистой катанки этот размер оптимален в диапазоне № 7- 11 по ГОСТ 5639, хотя для перлита 1-го балла определение размера перлитных колоний затруднено потому, что границы не выявляются по причине их разорванности – остатки ферритной сетки.

Приведенный обзор влияния различных факторов на качество катанки, а следовательно, затем и проволоки показывает, что производство ее складывается из большого количества операций, каждая из которых оказывает существенное влияние на конечное качество готового продукта.

На **рис. 4 и 5** представлены схемы конструкции линий Стелмор, соответственно, «короткий» и «длинный» варианты, установленные до и после реконструкции в условиях ОАО «Молдавский металлургический завод».

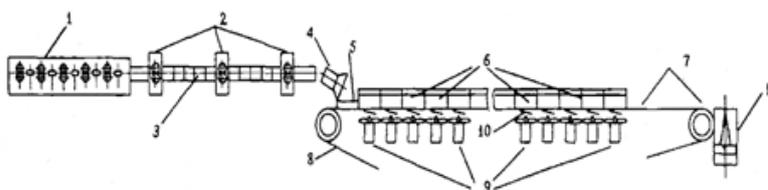


Рис. 4. Схема участка воздушного охлаждения проволоочной линии («короткий» Stelmor)

ОАО «ММЗ» до реконструкции:

- 1 - десятиклетевой проволоочный блок; 2 - трайб-аппараты;
- 3 - трасса водяного охлаждения;
- 4 – виткообразователь-виткоукладчик; 5 - приемный стол;
- 6 - секции под теплоизолирующими крышками;
- 7 - секции окончательного охлаждения; 8 - сетчатый транспортер;
- 9 - вентиляторы (до 15 штук, мощность 15 кВт);
- 10 - регулирующие заслонки; 11 - шахта виткосборника

Одним из эффективных методов понижения неоднородности в распределении цементита в высокоуглеродистых заэвтектоидных сталях является разрушение этой сетки деформацией-прокаткой при 800-750 °С (этот способ достаточно проблематичен, так на большинстве современных сортопроволочных станах такой уровень температуры неприемлем по энергосиловым параметрам установленного оборудования и снижением пластичности металла). Другим методом является ускоренное охлаждение раскатов водой или водовоздушной смесью в

интервале температур 950-700 °С после последней клетки стана, возможно также и охлаждение металла вентиляторным воздухом на линиях типа Stelmog со скоростью не более 25-30 °С/с.

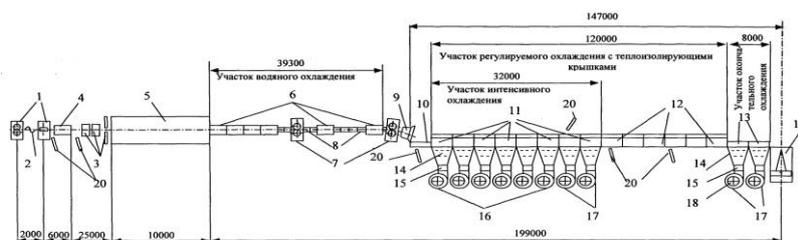


Рис. 5. Схема расположения технологического оборудования на участке охлаждения проволочной линии двуниточного мелкосортно-проволочного стана 320/150 ММЗ:

- 1- предчистовые клетки С и D; 2 - вертикальный петлерегулятор;
- 3 - ножницы: 54, 55 и 56, соответственно;
- 4 - секция предварительного водяного охлаждения;
- 5 - десятиклетевой проволочный блок;
- 6 - секции окончательного водяного охлаждения; 7 - трайбер;
- 8 - холостые проводки (участки выравнивания температуры проката);
- 9 - виткообразователь; 10 - приемный стол;
- 11 - секции интенсивного охлаждения;
- 12 - секции замедленного охлаждения;
- 13 - секции окончательного охлаждения;
- 14 - напорные коробки; 15 - выходные регулирующие аппараты;
- 16 - дутьевые вентиляторы мощностью 160кВт;
- 17 - дутьевые вентиляторы мощностью 55кВт;
- 18 - входные направляющие аппараты;
- 19 - шахта виткосборника; 20 – пирометры

По рекомендации известной фирмы металлургического машиностроения Danieli [21] режим термической обработки бунтового проката на линии Stelmog заключается в следующем: температуры металла перед проволочным блоком в пределах 950-1020 °С, после блока – не более 1080 °С, аустенитизации (виткообразования) – 810-830 °С, время термостатирования витков под теплоизолирующими крышками – примерно 800 с, что обеспечивается скоростью транспортера витков на уровне 0,07-0,20 м/с, при этом гарантируется скорость воздушного охлаждения на второй стадии линии Stelmog – 0,3 – 0,5 °С/с. В этом случае на второй стадии охлаждения формируется структура мелкозернистого перлита, эффективная для последующей механической обработки проката. По-нашему мнению, эта технология достаточно приемлема только с учетом поточного характера термической обработки и более высоких скоростей охлаждения, по сравнению с садочной термической обработкой (скорость охлаждения – примерно 0,006-0,012 °С/с), целесообразнее принять температуру аустенитизации (виткообразования) на уровне 950-980 °С, время охлаждения проката под теплоизолирующими крышками – 1000-1200 с, скорость транспортирования витков по роликовому транспортеру витков 0,07-0,10 м/с, скорость охлаждения, соответственно, равна 0,18-0,25 °С/с.

В данном случае более эффективнее применить технологию полной изотермической выдержки под теплоизолирующими крышками линии Stelmog, обеспечиваемую модернизацией участка воздушного охлаждения (например, установка электронагревателей и циркуляционных вентиляторов на теплоизолирующих крышках, которые обеспечивают в термотоннеле под ними режим изотермической выдержки). При этом следует отработать наиболее лучшую технологию.

Такая квазиизотермическая термическая обработка проводится для низкоуглеродистой легированной кадки сварочного назначения, металл под холодную объемную штамповку (ХОШ), пружинную проволоку там, где требуется сфероидизированный перлит.

На линии Stelmog термическую обработку подшипникового проката в бунтах для повышения обрабатываемости его резанием на структуру зернистого перлита проводят по технологии для проката из легированных инструментальных сталей [22].

При термической обработке на линии Stelmog можно рекомендовать следующие технологические режимы для проката в бунтах из конструкционных сталей: 1) из нелегированных углеродистых сталей – температуры металла перед проволочным блоком в пределах 950-1020 °С, после блока – не более 1080 °С, аустенитизации (виткообразования) – 950-980 °С, время термостатирования витков под теплоизолирующими крышками – примерно 450-600 с, что обеспечивается скоростью транспортера витков на уровне 0,18-0,26 м/с, при этом гарантируется скорость воздушного охлаждения на второй стадии линии Stelmog – 0,5–0,8 °С/с; 2) из среднелегированных сталей – соответственно 950-1020 °С, – не более 1080 °С, 950-980 °С, время термостатирования витков под теплоизолирующими крышками – примерно 750-800 с, что обеспечивается скоростью транспортера

витков на уровне 0,07-0,20 м/с, при этом гарантируется скорость воздушного охлаждения на второй стадии линии Stelmor – 0,3 – 0,5 °С/с. Допустима полная изотермическая выдержка металла под теплоизолирующими крышками при создании соответствующего оборудования.

Обработка на линии Stelmor – аналогична режиму термообработки, указанному для конструкционных легированных сталей.

В последнее время в качестве металла под ХОШ широко применяют борсодержащие стали, которые резко повышают эффективность изготовления деталей и изделий, произведенных методом ХОШ, за счет того, что микродобавки бора (0,002-0,005 % этого элемента в эффективном, свободном состоянии) обеспечивают равно-великую прокаливаемость проката диаметром до 20 мм при его легировании хромом, никелем, марганцем, молибденом в количестве от 0,5 до 1,0 % каждого элемента. С учетом сравнительной низкой стоимости бора, по сравнению с легирующими альтернативными химическими элементами, микролегирование им стали обеспечивает высокий экономический и технико-технологический эффект. Дополнительно к вышеуказанному, микродобавки бора (даже эффективного) обуславливают повышение ударной вязкости металла. Наиболее широко в промышленность внедрены следующие борсодержащие стали – 20Г2Р и 30Г1Р со следующим химическим составом: 20Г2Р – 0,20-0,25 % С; 0,90-1,30 % Мn; ≤ 0,20 % Si; ≤ 0,10 % Cr; ≤ 0,15 % Ni; ≤ 0,20 % Cu; ≤ 0,012 % N; 0,005-0,015 % В (для стандартной технологии – 0,002-0,005 %); ≤ 0,025 % P; ≤ 0,015 % S; 30Г1Р - 0,27-0,33 % С; 0,90-1,30 % Мn; ≤ 0,20 % Si; ≤ 0,10 % Cr; ≤ 0,15 % Ni; ≤ 0,20 % Cu; ≤ 0,012 % N; 0,005 -0,015 % В (для стандартной технологии – 0,002-0,005 %); ≤ 0,025 % P; ≤ 0,015 % S [23-26].

Коэффициент прокаливаемости (F) определяется по следующим зависимостям: $F = 1,0 + 1,5 (0,9 - [C]) \% \times [B] \%$; $F = 1 + 450 \times [B] \%$; эффективный бор рассчитывают по следующей формуле - $V_{эф.} \% = [B - (N - 0,002) - (Ti/5) - Zr/15]$.

Предложено микролегирование стали бором для стали под ХОШ в повышенном количестве (до 0,012 %). В этом случае часть бора (примерно половина) связывает азот, что приводит к пластификации стали за счет того, что азот в связанном состоянии выводится из твердого раствора внедрения кристаллической решетки железа и не образует облака Коттрелла вокруг дислокаций, облегчая их движение при деформации стали. Другая часть бора остается в свободном, эффективном состоянии или в виде боридов железа (FeB₂, FeB) и тем самым повышает прокаливаемость стали, которая повышается при относительно низких температурах аустенитизации стали.

В металлургической практике предлагаются следующие режимы поточной термической обработки на линии Stelmor - температуры металла перед проволочным блоком в пределах 950-1020 °С, после блока – не более 1080 °С, аустенитизации (виткообразования) – 780-820 °С (допускается 900-920 °С), время термостатирования витков под теплоизолирующими крышками – примерно 750-800 с, что обеспечивается скоростью транспортера витков на уровне 0,07-0,20 м/с, при этом гарантируется скорость воздушного охлаждения на второй стадии линии Stelmor – 0,3 – 0,5 °С/с. В этом случае на второй стадии охлаждения формируется структура пластинчатого перлита, соотношение феррита и перлита – 65/35 %, не эффективная для последующей пластической обработки проката методом ХОШ. По-нашему мнению, технология эта недостаточно приемлема. Более эффективен следующий режим: температура аустенитизации (виткообразования) – 950-980 °С, время термостатирования витков под теплоизолирующими крышками – примерно 1000-1200 с, что обеспечивается скоростью транспортера витков на уровне 0,07-0,10 м/с, при этом гарантируется скорость воздушного охлаждения на второй стадии линии Stelmor – 0,18 – 0,25 °С/с. В результате такой термической обработки формируется частично или полностью сфероидизированный перлит. Степень сфероидизации можно значительно повысить при использовании полной изотермической выдержки проката в потоке модернизированной (эта модернизация существует только в проекте) линии Stelmor [24-26].

Отжиг горячекатаного проката в бунтах на линии Stelmor возможен индивидуально для различных марок стали с изменением скорости охлаждения с ее снижением с увеличением степени легирования металла.

Технология сфероидизирующего отжига подката из подшипниковых сталей в бунтах на линии Stelmor: температура аустенитизации (виткообразования) – 950-980 °С, время термостатирования витков под теплоизолирующими крышками – примерно 1000-1200 с, что обеспечивается скоростью транспортера витков на уровне 0,07-0,10 м/с, при этом гарантируется скорость воздушного охлаждения на второй стадии линии Stelmor – 0,18 – 0,25 °С/с. В результате такой термической обработки формируется частично или полностью структура сфероидизированного перлита. Степень сфероидизации можно значительно повысить при использовании полной изотермической выдержки проката в потоке модернизированной (обеспечение полной изотермической выдержки заключается в установке электронагревателей и циркуляционных вентиляторов в теплоизолирующих крышках) линии Stelmor.

Технология термической обработки арматурного проката

Стержневая арматура, используемая в железобетонных конструкциях, является основным элементом, воспринимающим растягивающие нагрузки, обеспечивая тем самым прочность и надежность конструкции. При изготовлении железобетонных конструкций широко применяют предварительное натяжение арматуры, благодаря чему ограничивается ширина трещин в бетоне, а также повышается жесткость и выносливость таких конструкций [15, 27, 28].

По условиям эксплуатации арматурная сталь периодического профиля должна обладать определенным уровнем механических свойств, обеспечить надежное сцепление арматуры с бетоном и технологичность переработки профиля при изготовлении железобетонных конструкций (способность к правке, резке, сварке). В железобетонных конструкциях, работающих в условиях многократно повторяющихся нагрузок – железнодорожные мосты, шпалы, опоры линий передач электроэнергии, фундаменты прессов и т.д. арматурная сталь должна обладать достаточной усталостной прочностью. Наряду с этим, она должна обладать достаточной пластичностью, обеспечивающей возможность перераспределения нагрузок.

Кроме того, следует учитывать и другие требования, такие как склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением, свариваемость и хладостойкость.

Основной характеристикой арматурной стали служит минимальный предел текучести, по которому назначают расчетные коэффициенты нагружения.

Технология термической обработки арматурного проката с использованием специального нагрева

Этот способ в настоящее время уже не используется в промышленности. Ниже приведены сведения в историческом порядке.

Нагрев под закалку и отпуск стержней осуществляют путем пропускания тока через них. Электротермическое упрочнение (ЭТУ) арматурных стержней диаметром 10-20 мм и длиной 6-12 м проводят на автоматической установке, состоящей из нагревательного, закалочного и правильно-отпускного устройств.

ЭТУ позволяет из проката класса прочности АП(А300) из стали марки Ст5 получать арматурный термически упрочненный прокат класса Ат600, а из стали марки 35ГС класса прочности АП(А-400) - Ат800 и Ат1000. Оптимальная температура закалки стержней из стали марки Ст5 при скорости нагрева 10 °С/с составляет 920-950 °С. Наиболее благоприятное сочетание прочности и пластичности для стержней диаметром 16-18 мм достигают отпуском при 350-380 °С. Для стержней из стали марки 35ГС оптимальная температура закалки – 880-920 °С, а электроотпуска – 360-450 °С.

Нагрев под отпуск совмещают и с другими операциями, выполняемыми при армировании железобетона – высадкой анкерных головок и натяжением стержней.

ЭТУ арматурного проката было развито на заводах железобетонных конструкций (ЗЖБК).

Недостатки упрочнения арматурных стержней с отдельного нагрева - способ энергозатратен, производительность установок мала и повысить ее практически невозможно.

Технология термической обработки арматурного проката с тепла прокатного нагрева

Термическое упрочнение с прокатного нагрева, по сравнению с упрочнением с отдельного нагрева, имеет ряд технических и экономических преимуществ. Технические преимущества заключаются в возможности использования для упрочнения изделий нагрева под прокатку, в меньшей длительности процесса, в получении более чистой от окалины поверхности и в возможности осуществления высокотемпературной термомеханической обработки, значительно повышающей механические свойства стали. Экономические преимущества заключаются в отсутствии дополнительных расходов электроэнергии или топлива, в резком снижении потребности в обслуживающем персонале и сокращении внутризаводских транспортных расходов.

В настоящее время технология прерванной или прерывистой (технология термоциклирования) закалки с самоотпуском с использованием тепла прокатного нагрева применяется фактически на всех сортовых и сортопроволочных цехах по производству арматурного проката с повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств.

Термическое упрочнение движущихся со скоростью 12-25 м/с арматурных стержней осуществляют от температуры конца прокатки 1050-1000 °С (иногда 1000-950 °С с учетом энергосиловых возможностей прокатных станов) до температуры самоотпуска 300-600 °С (в зависимости от класса прочности, который требуется произвести). За температуру самоотпуска принимают равную среднemasсовую температуру, устанавливаемую по всему сечению охлаждаемого проката, полученную за счет процесса самоотпуска охлаждаемого сечения. Охлаждение проката проводят высокоскоростным потоком воды, подаваемой форсуночными устройствами, являющегося одновременно с этим и гидротранспортирующим средством для перемещения проката через трассу термического упрочнения металла. Этому способствует наличие ребер на поверхности арматурного проката. Высокое давление (до 30 атм) не дает образовываться на поверхности металла т.н. паровой рубашки, скорость и равномерность охлаждения металла при этом увеличивается. Примеры линий водяного охлаждения и форсуночные устройства представлены на рис. 6-8.

Грубое управление процессом термической и термомеханической обработки проводят определением необходимого количества секций термоупрочнения в зависимости от класса прочности. Тонкое управление определяется температурой самоотпуска и, в ряде случаев, по показаниям прибора, измеряющего магнитные свойства охлажденного проката (приборы типа ЭМИД, ИМС и т.п.), которые корректируют путем изменения давления и расхода охладителя (воды), а также варьированием скорости (а точнее времени) охлаждения.

Механические свойства после термической или термомеханической обработки должны отвечать требованиям ГОСТ 10884, приведенным в табл. 1.

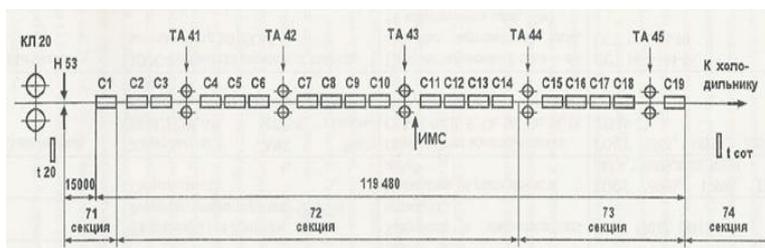


Рис. 6. Схема проектной линии термомеханической обработки стержневого проката типа Thermex:
 С1-С19 – секции охлаждения; ТА41-ТА45 – трайбаппараты;
 t_{20} , $t_{сот}$ – датчики температуры металла за 20-й клетью и самоотпуска; КЛ – клеть № 20; Н 53 – летучие ножницы;
 ИМС – измеритель магнитных свойств проката

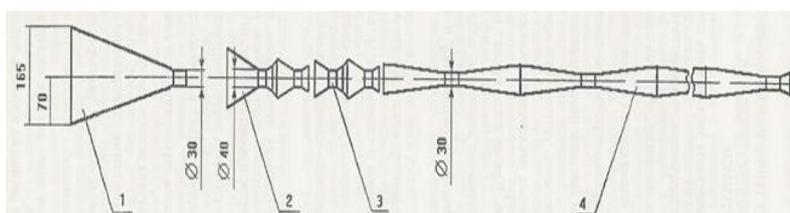


Рис. 7. Схема охлаждающего устройства линии Thermex:
 1 – входная воронка; 2 – корпус форсунки; 3 – патрубок;
 4 – труба охлаждения

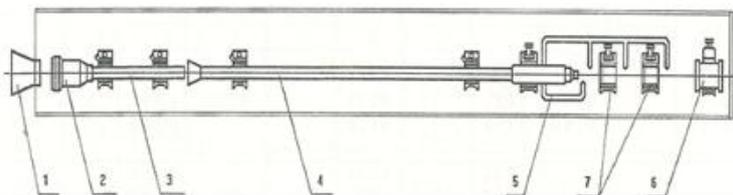


Рис. 8. Схема модернизированной секции охлаждения конструкции ОАО «ММЗ»:
 1 – входная воронка; 2 – форсунка; 3 – патрубок;
 4 – труба охлаждения; 5 – отсечка воздушная;
 6 – отсечка водяная; 7 – проводка

Таблица 1

Механические свойства термомеханически и термически упрочненной стержневой арматурной стали

Класс арматурного проката	Температура электронагрева, °С, не менее	Номинальный диаметр проката, мм	Механические свойства				Испытание на изгиб в холодном состоянии, град.	Диаметр оправки, мм
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	δ_p , %		
			не менее					
Ат400С	-	6-40	550	440	16	-	90	3d
Ат500С	-	6-40	600	500	14	-	90	3d
Ат600С	400	10-40	800	600	12	4	45	5d
Ат800	400	10-32	1000	800	8	2	45	5d
Ат1000	450	10-32	1250	1000	7	2	45	5d
Ат1200	450	10-32	1450	1200	6	2	45	5d

Примечание. d – диаметр проката.

С учетом того, что термомеханически упрочненная арматура склонна к существенному разупрочнению при температурах контактного электронного нагрева, используемого при ее натяжении стандартом предусмотрено установление класса прочности по временному сопротивлению и условному пределу текучести до и после электроконтактного нагрева до соответствующих температур.

Качество термомеханически упрочненного арматурного проката контролируют с помощью разрушающего метода (испытание на растяжение и изгиб с разгибом в холодном состоянии) и неразрушающего электромагнитного метода, допускаются и статистические способы аттестации металлопроката по корреляционной связи между параметрами.

Технология термического упрочнения - термической правки фасонных профилей проката [29-31]

При термическом упрочнении с прокатного нагрева создаются условия для реализации эффекта высоко-температурной термомеханической обработки. Упрочнение выполняют по схеме прерванной (можно и прерывистой) закалки при наличии соответствующего состава оборудования) закалки с самоотпуском поверхностного закаленного слоя. Прокат с температуры конца прокатки (температуры аустенитизации) 1000-1100 °С охлаждаются в потоке воды, подаваемой в камеру охлаждения через нагнетающую форсунку, движущегося со скоростью 15-25 м/с. Время охлаждения выбирают так, чтобы после прекращения интенсивного охлаждения и разогрева поверхности проката за счет тепла внутренних слоев равномерная среднемассовая температура – температура самоотпуска составляла 680-550 °С.

После такой термообработки на фасонном (угловом) прокате из стали марки СтЗпс получены следующие свойства: временное сопротивление разрыву 500-640 МПа, предел текучести 400-570 МПа, относительное удлинение на 5-ти кратной измерительной длине – 20-30 %, ударная вязкость – 0,8-2,25 МДж/м². Высокие значения ударной вязкости сохраняются и при отрицательных температурах, что позволяет использовать термически упрочненный фасонный прокат из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в ответственных строительных конструкциях, в том числе и при расчетных температурах до минус 65 °С.

В настоящее время производство фасонного проката сопровождается двумя основными проблемами.

Первая из них – это наличие на профилях, особенно несимметричного сечения (неравнополочные уголки, полособульбовый судостроительный профиль, тавровое сечение и т.п.), местного и/или общего искривления формы и даже размеров. Это связано с окончательным охлаждением металла после прокатки или на холодильнике в двухфазовой области – в межкритическом ($\gamma \rightarrow \alpha$) интервале температур (МКИТ), в котором и возникают растягивающие внутренние напряжения и вызывающие искривление раскатов. Применение роликово-правильных машин (РПМ) для исправления искривлений после окончательного охлаждения раскатов в ряде случаев неэффективно.

Вторая проблема заключается в высокой температуре окончания прокатки (т.н. температура конца прокатки), которая формирует крупное зерно аустенита и наследственно крупное действительное ферритно-перлитное зерно, что обуславливает крайне низкие значения предела текучести и отношения пределов текучести и прочности металла фасонных профилей, которые зачастую ниже требований НД и такой металл забраковывается. К такому металлу относятся марки стали 09Г2, 09Г2С, 25Г2С и др. Методы снижения размеров действительного зерна заключаются в понижении температуры конца прокатки, что в большинстве случаев ограничивается энергосиловыми возможностями установленного оборудования, и ускоренном охлаждении раскатов после окончания деформирования профилей с использованием форсуночных устройств водяного охлаждения и процесса прерванной или прерывистой закалки с прокатного нагрева с самоотпуском.

Последний технологический процесс, представляющий собой разновидность поточного термического или термомеханического упрочнения раскатов, наиболее эффективен как для правки профилей с целью исключения их искривления, так и для их упрочнения – повышения не только предела текучести и отношения пределов текучести и прочности, но и для обеспечения фасонным профилям свойств прочности, соответствующих более высокому классу прочности, которое ранее достигалось только за счет увеличения содержания легирующих упрочняющих элементов. Легирование значительно удорожает металлопродукцию заданного класса прочности.

Структура неохлажденного проката, полученного с высокой температурой конца прокатки, представляет собой разно- и крупнозернистый (размер действительного зерна достигает № 5 и 4 по ГОСТ 5639-82); даже при неинтенсивном воздушном охлаждении возможно появление видманштеттовой структуры или даже бейнитной структуры взамен перлита. Такой прокат характеризуется крайне неоднородными механическими свойствами по своей длине, возможно хрупкое разрушение металла. Так, например, в соседних участках проката из стали марки 09Г2С могут наблюдаться предел текучести и 320 (при норме – не менее 345 МПа) и 450 МПа, отношение пределов прочности и текучести, соответственно – 0,55 и 0,75-0,82. После ускоренного водяного охлаждения – размер действительного зерна снижается до № 7-8 с формированием однородной ферритно-перлитной структуры и получением равномерных механических свойств – предел текучести для проката из стали марки 09Г2С – 370-380 МПа, отношение пределов текучести и прочности – на уровне 0,66. После интенсивного водя-

ного охлаждения, характерного для термоупрочнения, формируется слоистая квазикомпозитная структура – структура закалки с самоотпуском и для проката из стали марки 09Г2С предел текучести равен 450 МПа и более, отношение пределов текучести и прочности – на уровне 0,72-0,75. У металла наблюдается при этом высокая пластичность и сопротивление хрупкому разрушению даже при отрицательных температурах.

На практике известны случаи применения интенсивного водяного охлаждения фасонных профилей, обеспечивающих получение обоих эффектов – и термоправки, и термоупрочнения; используется также и комбинированное воздействие – механическая правка, термическое упрочнение, возможно поверхностное (например, рельсы трамвайные и железнодорожные). Более часто на практике наблюдается такая обработка на мелких фасонных профилях наиболее симметричной формы (равнополочные уголки, швеллеры т.п.). Ниже представлен обзор методов термоправки - термомеханического упрочнения (ТП-ТМУ) фасонных профилей или уже применяемых на практике, или предлагаемых для использования некоторыми научно-технологическими организациями России, ближнего и дальнего зарубежья.

1. *Энергосталь-УкрНИИМет (Украина, г. Харьков)*. Предлагается применение универсальных водяных охлаждающих устройств струйного и в потоке сплошной воды фасонных профилей без существенных изменений оснастки при переходе на другие типоразмеры профилей. Охлаждение в две стадии – на первой более массивных участках сечения, на второй – всего сечения. Устройство устанавливается непосредственно после последней клетки стана. Имеется опыт внедрения установок термоправки на металлургических заводах СНГ – Нижнесергинский метизно-металлургический завод (НСММЗ), Макеевский металлургический комбинат (МакМК), Енакиевский металлургический завод.

Рассчитывается необходимое количество секций охлаждения достаточной длины (уточняется при проектировании), для осуществления транспортирования проката через секции охлаждения устанавливаются трайберы с фасонными роликами, соответствующими по форме проката, секции снабжаются универсальными форсуночными устройствами со щелевыми или круглыми отверстиями. Необходима система минимальной автоматизации управления процессом правки-упрочнения.

Необходима оценка системы водоснабжения и ее подготовки для обеспечения требуемых расхода и давления (до 20 бар ориентировочно) воды и чистоты воды по механическим взвесям и наличию масла с целью предотвращения засорения форсуночных устройств. Кроме того, следует обеспечить охлаждение воды особенно в летний период до необходимого уровня (примерно 23-25 °С). Требуется, при необходимости, проложить трассу для сброса отработанной воды с секций охлаждения на участке между последней клетью стана и холодильником. На **рис. 9 и 10** представлена схема двустадийного охлаждения фасонных профилей (первая стадия – охлаждение утолщенных элементов профиля, вторая стадия – общее охлаждение всего профиля).

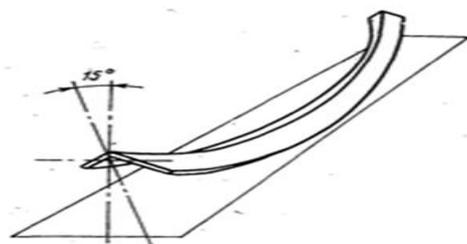
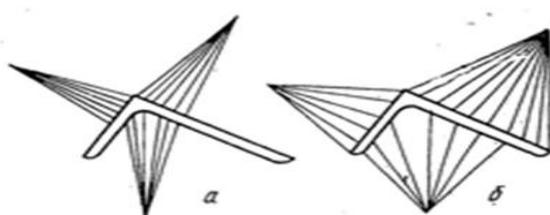


Рис. 9. Исходный неправленный неравнополочный уголок с искривлением в двух плоскостях – вертикальной и горизонтальной (т.н. дефекты формы – «лыжа» и «серп», соответственно)



**Рис. 10. Схема охлаждения элементов сечения углового профиля:
а – первая стадия процесса;
б – вторая стадия процесса**

На **рис. 11** представлено устройство для охлаждения неравнополочного уголка.

На **рис. 12 и 13** представлены универсальные устройства для ТП-ТМУ конструкции УкрНИИМет различных профилазмеров, прокатываемых на одном сортовом стане.

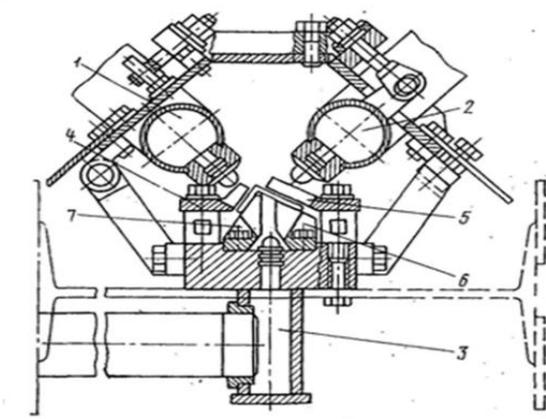


Рис. 11. Схема струевого устройства для охлаждения неравнополочного уголка конструкции УкрНИИМет:
1, 2, 3 - коллектора; 4, 5, 6, 7 - направляющие

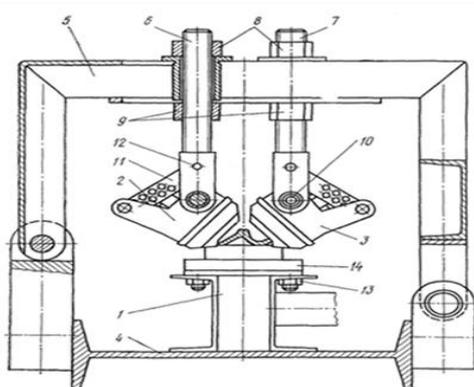


Рис. 12. Универсальные устройства для ТП-ТМУ фасонных профилей конструкции УкрНИИМет:
1, 2, 3 - коллектора, 4 - несущая балка, 5 - ребро короба,
6, 7 - винт, 8, 13 - гайки, 9 - фиксаторы винтов, 10 - оси,
11 - планки, 12 - фиксаторы планок, 14 - стол

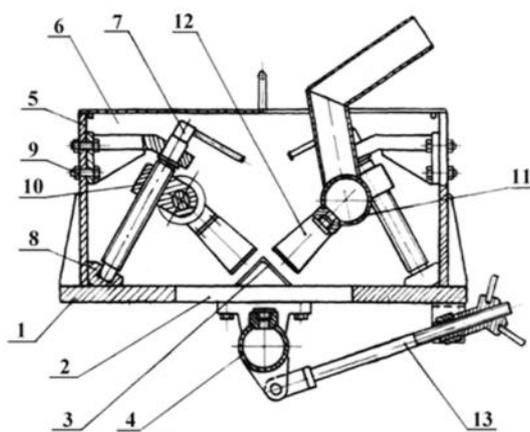


Рис. 13. Универсальные устройства для ТП-ТМУ фасонных профилей конструкции УкрНИИМет:
1 - основание, 2 - щели для сброса воды,
3 - охлаждаемый профиль, 4, 10, 11 - коллектора,
5 - стенка желоба, 6 - фланец, 7 - винт, 8 - подпятник, гайки,
9 - фиксатор, 12 - направляющая, 13 - тяга

2. *Группа компаний «Корад» (Россия, г. Москва).* Предлагается установка охлаждающих устройств за последней клетью стана с использованием тянущих роликов, причем, первый трайбер за прокатной клетью должен иметь вертикальные ролики для осуществления частичной механической правки по ширине и направления раскатов по отводящему рольгангу к холодильнику.

Опыта внедрения подобных установок на металлургических заводах нет.

Установить охлаждающие устройства либо форсуночного типа, либо какого-либо иного – это предмет разработки технического предложения с полной автоматизацией приводов и системы управления термоправкой-термоупрочнением фасонных профилей. Предусматривается установка универсальной или комбинированной (попеременно работающей как горизонтальная или как вертикальная клетки) клетей.

После анализа представленной информации принимается решение по водообеспечению и качеству охлаждающей воды. Одним из ресурсосберегающих решений может быть применение водо-воздушного охлаждения возможно с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Предлагается использовать последнюю клеть в группе в качестве трайбаппарата для создания межклетевого натяжения. Между последней - чистовой и последней - тянущей клетью размещаются секции охлаждения, обеспечивающие температуру профиля на выходе из тянущей клетки не более 650 °С и разностью температур по элементам сечения профиля не более 50 °С. Исключение коробления профилей после правки и охлаждения за счет выравнивания температуры по сечению профиля и завершение фазовых превращений должны заканчиваться в межклетевом пространстве под действием растягивающих напряжений. Для их создания в требуемом профиле предлагается в качестве тянущих роликов использовать комплект валков идентичных для чистовой клетки.

3. *Центр новых систем охлаждения и технологий термоупрочнения металлов ОАО ВНИИМТ» (Россия, г. Екатеринбург).* Сущность предложения – применение форсуночного экономного дифференцированного по разным сечениям профилей водо-воздушного секционного охлаждения.

Имеется опыт внедрения термоправящих и упрочняющих устройств в потоке станов – на Нижнесальдинском метзаводе (рельсовые подкладки), колесо-бандажный цех НТМК (закалка ж/д колес).

Установка секции охлаждения – термоправки/термоупрочнения равнополочных (по ГОСТ 8509) и неравнополочных уголков (ГОСТ 8510), швеллеров (ГОСТ 8240), предлагаемая для стана 350 ЧерМК, состоит из 5-ти секций длиной 5-6 м; для уголков предлагается по три форсунки сверху и снизу – 2-е из них интенсивно охлаждают массивную вершину снизу и сверху; для швеллеров – до 5-ти форсунок сверху и 3-и форсунки снизу. Расход общий воды на 5 секций – до 1400 м³/ч, давление воды – 1,5-2,0 бар, расход воздуха – 40 м³/ч. Скорость прокатки – 9-15 м/с.

По заверению представителей фирмы им не требуется повышенное количество, давление и качество охлаждающей воды.

4. *STG, Италия.* Предлагаются разные решения для правки симметричных и несимметричных профилей относительно вертикальной оси при их прокатке:

- для симметричных профилей (равнополочные уголки, швеллер, двутавр) – через систему направляющих роликов на отводящем рольганге к холодильнику и механическое натяжение раската на холодильнике путем применения противовесов (предполагает минимальное расстояние между последней клетью стана и холодильником), используются фасонные реечные переключатели устройства на холодильнике;

- для несимметричных (неравнополочный уголок, полособульб) профилей – система форсуночного водяного охлаждения в две стадии: на первой – интенсивное охлаждение массивной части профиля с воздушной отсечкой воды от других участков профиля, на второй – общее охлаждение всех частей сечения профиля.

5. *Bascotecniasteel, Испания.* Предлагается после последней клетки стана с универсальными валками устанавливать направляющее механическое устройство, которое центрирует и обеспечивает частичный эффект механической правки. При этом расстояние между последней клетью стана и холодильником составляет максимум 10 м. Близко к предложению фирмы STG для симметричных фасонных профилей.

Такое предложение, однако, закрывает возможности стана для проведения термической обработки проката в потоке и вряд ли может быть эффективным.

6. *Опыт ОАО «Молдавский металлургический завод».* ТП-ТМУ осуществлялась на проектной стационарной установке типа «усовершенствованный Thermex» для термического упрочнения арматурного проката в прутках. Техническое решение заключалось в использовании кустарной самодельной установки, конструкция которой включала в себя следующее. Для каждого профилеразмера (равнополочные уголки шириной полки 25-50 мм и толщиной 3-5 мм, швеллер № 5) подбирались по два (нижний и верхний) уголка большего размера прокатываемого профиля, в несущих уголках прорезались или круглые, или щелевые прорези. Несущие уголки помещались в ванну секции охлаждения линии «усовершенствованный Thermex», а между ними по входным направляющим подавался прокат, который надо было подвергнуть термическому воздействию. В работу в зависимости от профиля и цели водяного охлаждения вводились от 2 до 4-5 секций. Для обеспечения эффекта термической правки проводится охлаждение в первый период только массивных участков у вершин(ы) профиля, а затем в последующих секциях все участки профиля равномерно. Для упрочнения фасонных профилей применяют более интенсивное охлаждение. Особенно в последних секциях. Выбор интенсивности охлаждения

осуществляется эмпирически. Эффект ТП заключался в отказе от применения РПМ, а термоупрочнения – для проката из стали марки 09Г2С предел текучести обеспечивался не менее 450 вместо 330 МПа.

Все ресурсы имеются в составе прокатного стана и линии термического упрочнения проката в прутках. Внедрение технологии ТП-ТМУ фактически беззатратное.

При этом обеспечивается требуемая мелкозернистая или квазикомпозитная структура и удовлетворительный комплекс механических свойств.

7. ИЧМ НАНУ и ДМетАУ, Днепропетровск. Разработки по термической обработке-термической правке (ТУ-ТП) фасонных профилей относятся к 1973-1982 годам [32-36]. В работе [32] опробованы два способа охлаждения – форсуночное и спрейерное, что наилучшим образом приспособлено для охлаждения фасонных профилей с максимальным учетом неравномерности распределения массы по различным участкам их поперечного сечения. Поэтому расход и давление воды необходимо дифференцировать таким образом, чтобы, в первую очередь, обеспечить максимальный отбор тепла у наиболее массивных участков профиля. ТУ-ТП фасонных профилей, как уже указывалось, должны обеспечивать одновременно два требования – отсутствие искривления, коробления проката и повышение его прочностных характеристик с сохранением высокой пластичности, в том числе и при отрицательных температурах.

Наилучшие результаты для термического упрочнения уголков могут быть обеспечены при спрейерном охлаждении в устройствах двух типов (рис. 14, а и б работы [32]), швеллеров – в устройстве, показанном на рис. 15 [32]. В этом способе отбор тепла с более массивных участков сечения осуществляется не путем увеличенной подачи воды через отверстия большого диаметра, а за счет подачи воды струями меньшего или одинакового сечения, но повышенной плотности. При этом происходит повышение теплосъема с более массивных участков сечения профиля без существенного увеличения ее (воды) расхода на единицу поверхности. Главная особенность способа осно-вана на зависимости теплосъема от диаметра подаваемых водяных струй. Установлено, что зависимость эта обратно пропорциональная, то есть при одинаковом расходе воды с уменьшением диаметра водяных струй теплосъем возрастает при прочих равных условиях. Поэтому при одинаковом расходе воды на более массивных участках сечения изделия можно увеличить скорость охлаждения этих участков, изменяя способ подачи и размер водяных струй. Для обеспечения одинаковой скорости охлаждения при спрейере с диаметром отверстий 0,5 мм надо подать в 15 раз меньше воды, чем через спрейер с диаметром отверстия 2,4 мм.

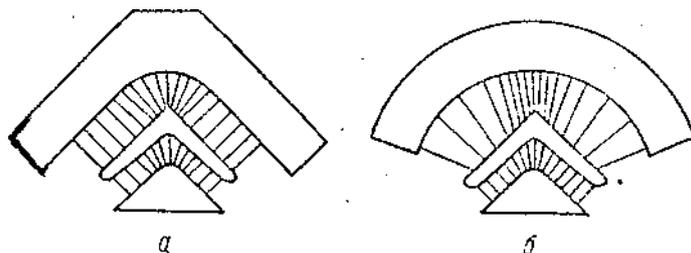


Рис. 14. Схема охлаждающих устройств для термического упрочнения угловых профилей проката проводкового (а) и сегментного (б) типов

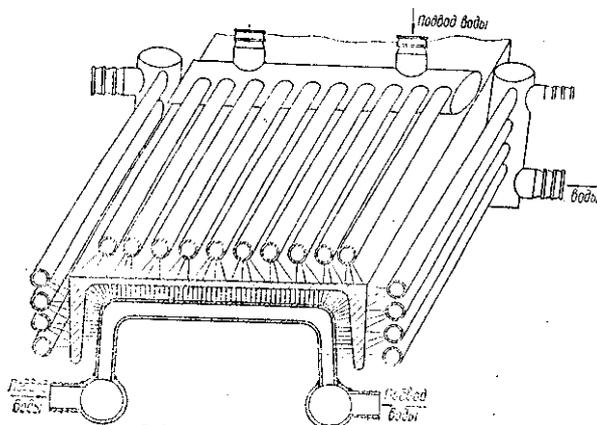


Рис. 15. Охлаждающее устройство для термического упрочнения швеллера

Охлаждение уголков мелких и средних размеров и швеллера № 30 для автомобильных рам грузовых машин большой грузоподъемности обеспечивает равномерное распределение температур и небольшую коробоватость профилей на длине раскатов до 60 м.

В работе [33] исследовался процесс ТУ-ТП швеллера № 30 для рам грузовиков из стали марки 15ХСНД следующего состава: химические элементы (%): 0,14 С; 0,55 Mn; 0,53 Si; 0,64 Cr; 0,50 Ni; 0,27 Cu; 0,026 S; 0,028 P; 0,016 Ti. Технология ТУ-ТП: температура аустенитизации швеллера длиной 10 м составляла 1000 °С, затем – струйная закалка при непрерывном поступательном движении профиля – сквозная закалка с последующим отпуском в течение 1 часа при различных температурах в диапазоне 450-600 °С в электрической 6-ти зонной роликовой проходной печи с последующим охлаждением на воздухе. При температуре отпуска равной 600 °С твердость составила 220-240 НВ, 550 °С – 240-260 НВ, 500 °С – 260-280 НВ, 400 °С – 280-300 НВ. При этом наблюдается повышение всех механических характеристик по сравнению с горячекатаным состоянием – временное сопротивление разрыву и предел текучести в 1,3-1,8 раз с повышением показателей пластичности и ударной вязкости даже при отрицательных температурах (до минус 40 °С).

Нормативные требования ГОСТ 19281 к химическому составу и механическим свойствам приведены ниже:

0,12-0,18 % С; 0,40-0,70 % Mn; 0,40-0,70 % Si; 0,60-0,90 % Cr; 0,30-0,60 % Ni; 0,20-0,40 % Cu; ≤ 0,040 % S; ≤ 0,035 % P; ≤ 0,008 %; ≤ 0,08 % As; $\sigma_B \geq 500$ МПа; $\sigma_{0,2} \geq 325$ МПа; $\delta_5 \geq 21$ %; КСУ₋₄₀ ≥ 29 Дж/см².

В табл. 2 приведены механические свойства после аустенитизации металла при 900 °С, сквозной закалки и отпуска при температуре в интервале 200-600 °С.

В работе [34] сделан обзор ускоренного охлаждения широкого сортамента сортового проката, в том числе и фасонных профилей, в первую очередь, со стороны их термической правки в условиях Криворожского стана 250-2 и стана 280 Енакиевского металлургического завода. Подтверждена технология ускоренного охлаждения такого проката – сначала на первом этапе охлаждение массивных участков профилей в местах сопряжения полок, стоек и полок и т.д. при температуре 500-750 °С, а затем на втором этапе – всего профиля в интервале температур 700-950 °С с регламентированием времени паузы между этапами ускоренного охлаждения.

Таблица 2

Механические свойства после термической обработки

Механические свойства	Температура отпуска, °С				
	200	300	400	500	600
$\sigma_{0,2}$, МПа	1220	1160	1080	840	640
σ_B , МПа	1450	1370	1170	930	740
δ_5 , %	10	10	11	15	20
Ψ , %	56	57	58	62	68
КСУ, кДж/м ²	78	-	78	118	176
НВ	425	410	360	275	220

После ускоренного охлаждения наблюдается повышение прочностных свойств, в частности предела текучести, в 1,5-2,0 раза и рост ударной вязкости и хладостойкости металла профилей. Результаты, подтверждающие эффект термического упрочнения-правки, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика свойств фасонных профилей после термоупрочнения

Профиль	Марка стали	σ_t , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	Ударная вязкость, КСУ, МДж/м ² при температуре		
						+ 20	- 40	- 60
Швеллер № 16	Ст3сп	435-455	580-620	16-17,5	45,5-52	1,1-2,0	0,6-1,3	-
Уголок 200x200x25	Ст3сп	≥ 335	≥ 530	≥ 19	≥ 53,5	1,0-1,8	0,6-1,1	-
Уголок 32x32x4	Ст3пс	380-410	500-530	15-16	47-52	-	-	-
Уголок 36x36x4	Ст3сп	≥ 510	≥ 610	17,5	-	1,0	-	1,0

Наиболее эффективно применение прерывистого охлаждения или термоциклирования.

Скорость охлаждения, как комплексный показатель степени упрочнения металла, зависит от нескольких факторов таких, как расход и давление воды, расстояние между охлаждаемым металлом и спреером, количество и диаметр отверстий для водяных струй, площади истечения воды, коэффициента теплоотдачи. Это относится к струйному или спреерному охлаждению. На первом этапе охлаждения соотношение расходов воды при спреерном охлаждении массивных частей профиля и остальных участков должно быть 2:1, на втором этапе – 1:1, а расходы сверху и снизу – 1:1,5. Возможно применение водо-воздушной смеси. При этом зависимость

скорости охлаждения от доли воды в смеси представляет параболу – чем выше доля воды в смеси, тем выше и скорость охлаждения. Недостаток водовоздушного охлаждения заключается в неравномерности – непостоянстве потока охладителя по длине и сечению струй.

Наилучший результат по однородности охлаждения имеют форсуночные устройства – устройства охлаждения в сплошном потоке воды. Эти устройства могут быть противоточными и проточными. При проточных форсунках осуществляется двойное действие – сам процесс охлаждения и транспортировка охлаждающих изделий – проката. Для противоточных форсунок – максимально возможное охлаждение, но низкая транспортирующая способность, требующая применения тянущих роликов – трайберов. В свою очередь, трайберы работают нестабильно, что приводит к нагону раскатов в секциях охлаждения и авариям. Применяют также комбинированные установки – прямо-противоточные, где частично компенсируются указанные выше недостатки.

Работа [35] посвящена термической обработке мелкосортных профилей на стане 250-2 Криворожстали. Установка упрочнения установлена от последней клетки на расстоянии 1,9 м и представляет собой блоки охлаждающих устройств и секции транспортирующего рольганга. Общая длина охлаждающего короба – 16 м. В составе установки насосная станция с насосами 313200x4 и очищающие фильтры ИЗТМ, а также система гидромагистралей (водопроводов) с запорной, регулирующей и измерительной аппаратурой. Пневмопривод перемещения охлаждающих устройств коаксиально.

Термическое упрочнения профилей заключается в прерванной закалке с самоотпуском и последующим электрическим отпуском. Так, для уголка 40x40x4 из стали марки СтЗсп (0,16 % С; 0,42 % Мn; 0,04 % Si; 0,010 % Р; 0,038 % S) скорость прокатки – 7,5 м/с; температура конца прокатки – 1020-1070 °С; время охлаждения – 1 с в воде; давление охладителя – 12 ати; температура воды – 38 °С; охлаждаемый прокат 80 м. После охлаждения получен следующий комплекс механических свойств: временное сопротивление разрыву – 1290 МПа, условный предел текучести – 110 МПа, относительное сужение – 33 %, относительное удлинение десятикратное – 5 %. Микроструктура образца: вершина уголка – продукты распада аустенита в промежуточной области (бейнит) в сетке феррита; полки уголка – тоже без ферритной сетки.

После электроотпуска (нагрев электросопротивлением, контроль температуры металла тремя термопарами по краям и середине прокатного прутка) по следующим режимам:

- время нагрева 53-56 с, температура отпуска – 300 °С;
- время нагрева 70-78 с, температура отпуска – 400 °С;
- время нагрева 95-112 с, температура отпуска – 500 °С;
- время нагрева 120 с, температура отпуска – 600 °С;
- время нагрева 197 с, температура отпуска – 700 °С.

При увеличении температуры отпуска с 300 до 700 °С наблюдается снижение временного сопротивления разрыву металла уголков с 1150 до 550 МПа, условного предела текучести – соответственно, с 1020 до 450 МПа; а для относительного сужения – повышение значений с 40 до 60 %; относительного десятикратного удлинения – с 4 до 17 %. Твердость после отпуска равнялась при 300 °С – 320-270 HV₂₀, 400 °С – 260-230 HV₂₀, 500 °С – 230-200 HV₂₀, 600 °С – 200-150 HV₂₀, 700 °С – 150-105 HV₂₀. При всех температурах электроотпуска снижение твердости проходит в направлении от края полок к вершине уголка на 30-50 HV₂₀.

В работе [36] указано, что максимальный эффект термического упрочнения достигается процессом прерванной (еще лучше - прерывистой) закалкой в турбулентном потоке воды и в спрейерных системах при давлении охладителя 6-10 (4-10 для спрейеров) ати. Эксперименты с охлаждением и отпуском с отдельного нагрева в газозовых печах (в условиях Коммунарского металлургического завода) проводились по следующим режимам – нагрев до 800-1100 °С – охлаждение водой с расходом 2000 м³/ч и давлении 16 ати – рольганг – отпуск в течение 1 часа в колпаковой печи.

Проходные спрейера сооружаются по форме охлаждаемого профиля, устанавливаются между роликами транспортного рольганга. Равномерный теплосъем осуществляют путем избирательного направленного охлаждения массивных элементов и последующего недифференцируемого охлаждения профиля по всей поверхности в спрейерах с автономным регулированием расхода водой в верхнем и нижнем поверхностях.

Упрочнение швеллеров проводится в спрейерной системе из 8-ми секций длиной по 1 м. В 1-3 секциях осуществляют охлаждение мест сочленений полок и стенок при скорости движения швеллера 0,95 м/с с полным остыванием полок швеллера. Повышение давления воды до 6 ати с распределением сверху и снизу потока охладителя позволяет провести термическую правку профиля до остаточного искривления в горизонтальной плоскости (серп) до 50-90 мм на длине 6 м.

Термическое упрочнение и правка уголков, швеллеров, двутавров осуществляется в соответствующих секциях по индивидуально подобранным технологическим режимам.

Технология термической обработки мелющих шаров [37-39]

В табл. 4 представлены данные по химическому составу и механическим свойствам (распределение твердости по радиусу поперечного сечения шаров), соответствующие требованиям российской нормативной документации (НД) – ГОСТ 24182 (заменен на ГОСТ 51685), ГОСТ 5950, а также требованиям мировой практики по изготовлению мелющих шаров.

Таблица 4

Обзор химического состава сталей и распределения твердости мелющих шаров

№ п/п	Марка стали и источник информации	Массовая доля химических элементов, %											Твердость, HRC						
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	V	Mo	Al	B	Ti	Поверхность	На 1/2 папульца	В центре	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1. Литературные данные																			
1.	Мировая практика: - кованные и катаные шары - катаные - литые (сейчас не применяют)	0,40-0,80 +	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2.	ГОСТ 24182	0,74-0,82	0,75-1,15	0,40-0,80	-	-	0,40-0,60	-	-	-	0,05-0,15	-	≥ 0,02	-	0,007-0,025	≤ 42 ед.	-	-	-
3.	X по ГОСТ 5950	0,95-1,10	0,15-0,45	0,10-0,40	-	-	1,30-1,60	-	-	-	-	-	-	-	-	55 ²	-	-	45
4.	XГС по ГОСТ 5950	0,99-1,05	0,40-0,70	0,85-1,25	-	-	1,30-1,65	-	-	-	-	-	-	-	-	55 ²	-	-	45
5.	Moly Cop	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	~1	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	Нет св.	≥ 62	-	-	≥ 60
6.	Завтек-тонная	1,2-1,6	0,2-12	0,75-2,5	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
7.	Завтек-тонная	-	0,72-5,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 53 ед. Mn=3,5-4,5%	-	-	-

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8.	Ш2	0,60- 0,90	0,60- 0,80	0,15- 0,35	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,30	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	-	-	-	62	6 мм от пов- ти-50	8-24 мм от П-ти - 40
9.	Новая марки	0,65- 0,75	0,70- 0,80	0,20- 0,35	≤ 0,035	≤ 0,035	0,40- 0,50	≤ 0,3	≤ 0,3	0,005- 0,025	-	-	0,015- 0,020	0,001- 0,003	0,005- 0,010	62	12 мм от П- ти - 62,16 мм - 50	20 мм от П- ти - 40
10.	55СМФА	0,53- 0,60	0,30- 0,60	0,80- 1,10	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,30	≤ 0,3	≤ 0,25	-	0,15 0,25	0,40 -	-	-	-	55- 58	-	-

Окончание таблицы 4

2. Предлагаемые варианты по химическому составу и формируемой твердости²																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	УО 110Х2Г2САНФ	0,9- 1,2	0,8- 1,5	≤5,0	≤ 0,015	≤ 0,010	1,0-1,7	0,4 -	≤ 0,3	≤ 0,015	0,15- 0,25	-	≤ 0,005	-	-	64- 62	64-62	64-62
2.	УО 110Х2Г2САМФ	0,9- 1,2	0,8- 1,5	≤5,0	≤ 0,015	≤ 0,010	1,3-1,7	0,4 -	≤ 0,3	≤ 0,015	0,15- 0,25	0,20 -	≤ 0,005	-	-	64- 62	64-62	64-62
3.	УО 110Х2Г2САНФР	0,9- 1,2	0,8- 1,5	≤5,0	≤ 0,015	≤ 0,010	1,0-1,7	0,4 -	≤ 0,3	≤ 0,015	0,15- 0,25	-	≤ 0,005	0,005- 0,010	-	64- 62	64-62	64-62
4.	УО 110Х2Г2САМФР	0,9- 1,2	0,8- 1,5	≤5,0	≤ 0,015	≤ 0,010	1,3-1,7	0,3 0	≤ 0,3	≤ 0,015	0,15- 0,25	0,20 -	≤ 0,005	0,005- 0,010	-	64- 62	64-62	64-62

Примечания: 1. Обозначения и сокращения: + элемент нормируется, но не указан в литературном источнике; - элемент не нормируется для данной марки стали; Нет св. - в литературе не имеется сведений; УО - условное обозначение предлагаемой марки стали.

2. Термическая обработка по следующему режиму: закалка с 840-860 °С в масле и отпуск при 100 °С; 3. Применяется термическая обработка.

Анализ литературных данных (см. **табл. 4**) и особенностей структурообразования при производстве мелющих шаров диаметром 15-120 мм повышенного качества позволяют получить следующие положения.

1. Необходимо отдать предпочтение материалу для изготовления шаров стали против чугуна потому, что для получения заданных свойств мелющих шаров следует использовать сложно легированный химический состав чугунов – или комплексно легированные хромом, марганцем, титаном, бором, алюминием, ниобием и др. элементами белые чугуны, или серый чугун повышенной прочности, что обуславливает высокую стоимость этих материалов и соответственно низкую эффективность производства из них мелющих шаров. Кроме того, сам процесс производства литых качественных мелющих шаров достаточно сложен.

2. В отечественных стандартах нормируется пониженный уровень механических свойств (твердости) по радиусу шаров по сравнению с передовой за рубежом практикой. Так, в ГОСТ 7524 заложены низкие нормативы по твердости для поверхности шаров диаметром 15-120 мм– 35-43 HRC (первая группа), 38-49 HRC (вторая группа), 50-55 HRC (третья группа), 55 и 45 HRC для четвертой группы, соответственно, на поверхности и на глубине 0,5 радиуса шара. Причем, если для первой-третьей группы нормируется только поверхностная твердость для всего диапазона шаров (15-120 мм), то четвертая группа - для шаров диаметром 15-70 мм.

3. Лучшие зарубежные шары имеют нормативную поверхностную твердость не менее 64, а в центре шара – на уровне 62-64 HRC.

4. Обычно применяются следующие режимы поточной термической обработки стальных катаных шаров, полученных методом поперечно-винтовой горячей прокатки. Один из таких способов – метод одностадийного охлаждения в потоке воды в течение до 35 с. Другой – метод двухстадийного охлаждения: на первой стадии – поточное водяное охлаждение в закалочном баке в течение 30 с с температурой самоотпуска на уровне 220-250 °С, на второй стадии – в проточной воде на полках конвейера в течение 45 с для шаров диаметром 40-60 мм с обеспечением температуры самоотпуска на уровне 200 °С. Для стали с химическим составом марки 75Г твердость на поверхности шара была равна 62 HRC, глубине 6 мм – 50 HRC, на глубине 8 мм – 40 HRC. Для стали с химическим составом марки 75ХГРТЮ прокаливаемость шара увеличивается – уровень твердости, равный 62 HRC, сохраняется на глубине 12 мм. Таким образом, имеется значимая связь структуры-свойств от химического состава стали и режима термической обработки.

На основании вышесказанного, в настоящем исследовании поставлена задача выбрать эффективные химический состав стали и режим термической обработки в потоке производства стальных шаров.

С учетом того, что углерод, марганец, хром и молибден будут работать в сталях как упрочняющие элементы (углерод, марганец и хром – в первую очередь, по твердорастворному механизму, молибден – карбидообразующий элемент). Ванадий и никель – элементы, повышающие ударную вязкость сердцевины мелющих шаров: ванадий нитридообразующий элемент, обеспечивающий дисперсионное твердение металла, а никель – одновременно повышает прокаливаемость стали, и улучшает сопротивление ударным нагрузкам. Поэтому, по нашему мнению, наиболее приемлема для производства качественных мелющих шаров является сталь химического состава, приведенного в **табл. 5**.

Таблица 5

**Рекомендуемый химический состав стали
для шаров повышенного качества**

Вариант	Массовая доля химических элементов, в диапазоне или не более, %						
	C	Mn	Si	Cr	V	Ni	Mo
1	0,9-1,2	0,8-1,5	0,50	1,0-1,7	0,15-0,25	0,40-0,60	-
2	0,9-1,2	0,8-1,5	0,50	1,3-1,7	0,15-0,25	-	0,20-0,40

Для обеспечения мелющим шарам высоких значений твердости (64-62 HRC) и относительно равномерного ее распределение по радиусу шара следует эмпирически подобрать режимы поточной термообработки – режимы термоциклирования шаров, прокатанных на станах поперечно-винтовой прокатки. Термоциклирование заключается в многократном повторении процессов закалка - выравнивание температуры на воздухе за счет самоотпуска закаленных слоев теплом сердцевины шара. При этом каждый последующий цикл будет обрабатывать последующий слой от поверхности к сердцевине шара, получая (при правильном подборе параметров термической обработки – время и интенсивность закалки и время выравнивания температуры в зависимости от диаметра шара) равную твердость в пределах 64-62 HRC. Количество термоциклов будет увеличиваться с повышением диаметра мелющего шара (от 15 до 120 мм) от 2 до 4-5 циклов.

Для уточнения режимов термоциклирования можно использовать методы математического моделирования с уточнением его результатов прямым экспериментом в лабораторных и промышленных условиях.

Выводы

В статье рассмотрены некоторые современные особенности технологии и оборудования при проведении термической обработки сортового проката в бунтах и прутках, а также фасонного проката непосредственно в потоке прокатного стана с использованием тепла прокатного нагрева по схеме прерванной или прерывистой (термоциклирующая обработка) закалки с самоотпуском. Такая технология формирует в металле уникальный комплекс микроструктуры и свойств, имеет низкую себестоимость и высоко эффективная.

Подробно представлены конструкции линии двустадийного охлаждения бунтового проката Stelmor и проанализированы технологические режимы термической обработки металла на таких линиях, предлагаемые как представителями металлургического машиностроения, так и металлургическими заводами. В статье раскрыты широкие возможности различных конструкций и технологий термической обработки проката за счет варьирования в значительном диапазоне скоростей охлаждения металла на воздушной – второй стадии с выбором рациональной температуры аустенитизации стали перед раскладкой на витки на первой стадии – стадии водяного охлаждения, заключающейся в определении температуры виткообразования. На основании проведенного анализа предложена идеология модернизации действующих линий Stelmor с целью усовершенствования их конструкций и технологии, и в конечном итоге обеспечения проведения на линии двустадийного охлаждения в потоке технологии полной изотермической обработки (установка на участке теплоизолирующих крышек электроподогревателей и циркуляционных вентиляторов) для осуществления таких видов термической обработки, как сфероидизирующий и рекристаллизационный отжиги, патентирования и т.п.

В статье рассмотрены также состав оборудования и технология термоправки – термомеханического упрочнения фасонного проката. Показано, что имеются все предпосылки для внедрения вышеуказанной технологии в массовое производство на металлургических заводах с получением высоких результатов по сохранению правильно формы и точных размеров сложных фасонных профилей в сочетании с эффектом термомеханического упрочнения (в металле гарантируется повышения прочностных характеристик в 1,5–2,0 раза при сохранении высоких пластических характеристик и ударной вязкости до минус 70 °С).

После проведения литературного анализа и деятельности производителей мелющих шаров показано отставание отечественных изготовителей по обеспечению качественных показателей этой продукции, и доказана перспективность и эффективность внедрения новой технологии поточной термической обработки шаров с использованием термоциклирования.

Список литературы

1. Сычков, А.Б. Развитие устройств и способов для термической обработки катанки [Текст]: научная статья / А.Б. Сычков, С.О. Малашкин, М.А. Жигарев // Сталь. 2015. № 10. С. 50-54.
2. Сычков, А.Б. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки [Текст]: монография / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.Ю. Столяров, М.А. Шекшеев, С.Ю. Жукова, С.О. Малашкин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова», 2014. 257 с.
3. Сычков, А.Б. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки [Текст]: монография / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов, И.Н. Чуйко. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.
4. Патент США № 3231432 от 25.01.1966 г. МПК: B21C 47/262, C21D 9/525. Process for the quenching of hot rolled rods in direct sequence with rod mill/D.W. M'Lean, C.G. Easter. Morgan Construction Company. Canada, Ontario.
5. Патент США № 3390871 от 02.07.1968 г. МПК: B21C 47/262, C21D 1/84, C21D 9/525, C21D 9/5732. Apparatus for the controlled cooling of rods/D.W. M'Lean, C.G. Easter. Morgan Construction Company. Canada, Ontario.
6. Парусов, В.В. Структура и свойства катанки из борсодержащих сталей, предназначенной для изготовления сварочной проволоки [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 3. С. 48-51.
7. Парусов, В.В. Формирование оптимальной структуры в высокоуглеродистой катанке [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин // Сталь. 2005. № 1. С. 82-85.
8. Парусов, В.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки [Текст]: монографии / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, Э.В. Парусов Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.
9. Патент США № 4491488 от 01.01.1985 г. МПК: B21B 1/18, C21D 9/52, B21B 43/08. Steel rod rolling process / M. Gilvar, R.V. Russel. Morgan Construction Company.
10. Патент США № 4580353 от 08.04.1986 г. МПК: C21D 9/573, C21D 9/52, B21B 42/02, B21B 43/00. Apparatus and method for air cooling hot rolled steel rod/C.H. Gage, A.A. Jalil. Morgan Construction Company.
11. Богданов, Н.А. О целесообразности ограничения содержания примесей цветных металлов в углеродистой катанке [Текст]: научная статья / Н.А. Богданов, А.В. Кутаков, А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко // Сталь. 2000. № 1. С. 67-69.
12. Парусов, В.В. Новое применение бора в металлургии [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 1 (9). С. 15-17.
13. Парусов, В.В. Исследование возможности наиболее полного удаления окислы с поверхности катанки перед волочением [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.Н. Савьюк, А.Б. Сычков, А.М. Нестеренко, А.А. Олейник, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин // Металлург. 2004. № 6. С. 69-72.
14. Сычков, А.Б. Формирование оптимальных свойств окислы на поверхности катанки [Текст]: монография / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, С.Ю. Жукова, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов, А.М. Нестеренко, В.В. Парусов. Бендеры: Полиграфист, 2008. 292 с.
15. Сычков, А.Б. Высокоуглеродистая катанка для изготовления высокопрочных арматурных канатов [Текст]: монография / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов. Бендеры: Полиграфист, 2010. 280 с.

16. Патент Великобритании № 1199750 от 22.07.1970 г. МПК: B21B 42/02, B21C 47/14, B21C 47/26. Schloemann AG (DE). Improvements in Plant for the Treatment of rolled wire Product from mill Heat.
17. Tominaga, J. New process of in-line heat treatment in wire rod mills [Текст]: научная статья / J. Tominaga, K. Matsuoka, S. Inoue // Wire Journal International. 1985. № 2. P. 62-72.
18. Nakamura, Y. The manufacture of high quality steel wire rods using the newly developed controlled rolling process (ККР) [Текст]: научная статья / Y. Nakamura, A. Sannomiya, Takahashi // Conference Proceeding, 50-th Annual Convention. Ohio. 1980. Okt. 5-9. P. 118-123.
19. Парусов, В.В. Высокоуглеродистая катанка из стали, микролегированной ванадием [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, А.В. Перчаткин, Э.В. Парусов, М.А. Жигарев // Металлург. 2004. № 12. С. 63-67.
20. Сычков, А.Б. Высокоуглеродистая катанка из стали с повышенным содержанием хрома [Текст]: научная статья / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин, В.А. Берковский, А.И. Крулик // Металлург. 2006. № 4. С. 59-62.
21. Danieli structure control system. DSC. Lestani Massimo – manager of metallurgical department. Rolling mill division. Danieli – Morgardshammer. Butrio. Italy. 1995. 51 p.
22. Башнин, Ю.А. Технология термической обработки стали [Текст]: Учебник для вузов / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. М. Металлургия, 1986. 424 с.
23. Лякишев, Н.П. Борсодержащие стали и сплавы [Текст]: монография / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
24. Парусов, В.В. Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий [Текст]: монография / В.В. Парусов, О.В. Парусов, А.Б. Сычков. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2010. 160 с.
25. Парусов, В.В. Разупрочняющая термомеханическая обработка проката из углеродистой стали [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, В.А. Луценко, Э.В. Парусов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 6. С. 54-56.
26. Парусов, В.В. Влияние бора на фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистых сталях для холодной объемной штамповки [Текст]: научная статья / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, О.В. Парусов, В.Г. Черниченко, И.В. Деревянченко, Д.Н. Тогобицкая, Э.В. Парусов // Теория и практика металлургии. 2004. № 6. С. 69-74.
27. Сычков, А.Б. Технологические особенности производства арматурного проката широкого назначения [Текст]: монография / А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 499 с.
28. Мадатян, С.А. Арматура железобетонных конструкций [Текст]: монография / С.А. Мадатян. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
29. Сычков, А.Б. Оборудование и технология для термоправки-термомеханического упрочнения фасонного профиля [Текст]: научная статья / А.Б. Сычков, С.О. Малашкин // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 2 (15). С. 96-101.
30. Вакула, Л.А. Принципы оптимального проектирования технологии термической правки угловых профилей [Текст]: научная статья / Л.А. Вакула, С.В. Верчиков, О.А. Чабаненко // Сортопрокатное производство. Отраслевой сборник научн. трудов. Харьков: УкрНИИМет, 1990. 3 п.л.
31. Серебряков, С.В. Оперативная оценка механических свойств, степени и равномерности закалки при контроле технологического процесса термоупрочнения фасонного проката [Текст]: научная статья / С.В. Серебряков, Л.И. Конорева, А.А. Соколов и др. // Бюл. НТИ. Черная металлургия. 1988. № 19 (1071). С. 55-56.31.
32. Долженков, И.Е. Спрейерное охлаждение фасонных профилей проката при термическом упрочнении [Текст]: научная статья / И.Е. Долженков, В.Д. Верболоз, В.К. Фролов, В.В. Ковалюк / Металлургия и коксохимия: Сб. научн. тр. 1973. № 36. С. 90-92.
33. Стародубов, К.Ф. Исследование влияния термического упрочнения на свойства и микроструктуру швеллера № 30/К.Ф. Стародубов, И.Е. Долженков, В.Д. Верболоз, В.В. Ковалюк, А.П. Артеменко, В.М. Андрощук // Металлургия и коксохимия: Сб. науч. тр. 1973. № 36. С. 93.
34. Худик, В.Т. Современные технологические схемы, способы и устройства для ускоренного охлаждения сортового проката / В.Т. Худик, В.Т. Черненко. БНТИ. Черная металлургия. 1982. № 10. С. 9-19.
35. Савенков, В.Я. Термическая обработка мелкосортного углового проката в потоке непрерывного стана 250-2 завода «Криворожсталь» / В.Я. Савенков, Ю.Т. Худик, В.А. Сацкий, В.Т. Худик, М.И. Костюченко, О.В. Филонов, В.Т. Черненко // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1977. № 1. С. 36-37.
36. Поляков, С.Н. Термическое упрочнение средне- и крупносортных фасонных профилей проката / С.Н. Поляков, Е.Н. Бухиник, В.Т. Черненко, А.Н. Несмачный, В.А. Горецкий // Металловедение и термическая обработка. 1977. № 11. С. 1039-1044.
37. Сычков, А.Б. О выборе материала и режима термической обработки стальных мелющих шаров, отвечающих требованиям современного мирового рынка [Текст]: научная статья / А.Б. Сычков, А.Б. Стеблов, С.Н. Березов // Литье и металлургия. 2013. № 3 (71). С. 30-32.
38. Стеблов, А.Б. Литые чугунные шары для помола материалов [Текст]: научная статья / А.Б. Стеблов, С.Н. Березов, А.А. Козлов // Литье и металлургия. 2012. № 3 (66). С. 45-49.
39. Поддубный, А.Н. Краткий обзор технологий, применяемых в мировой практике при производстве мелющих тел [Текст]: научная статья / А.Н. Поддубный // Литейщик России. 2008. С. 30-35.

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА «ПРОКАТКА - РАВНОКАНАЛЬНОЕ УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ»

¹Найзабеков А.Б., ¹Лежнев С.Н., ^{2,3}Панин Е.А., ³Койнов Т.А.

¹Рудненский индустриальный институт,

г. Рудный, Республика Казахстан

²Карагандинский государственный индустриальный университет,

г. Темиртау, Республика Казахстан

³Университет химической технологии и металлургии,

г. София, Болгария

1. Введение

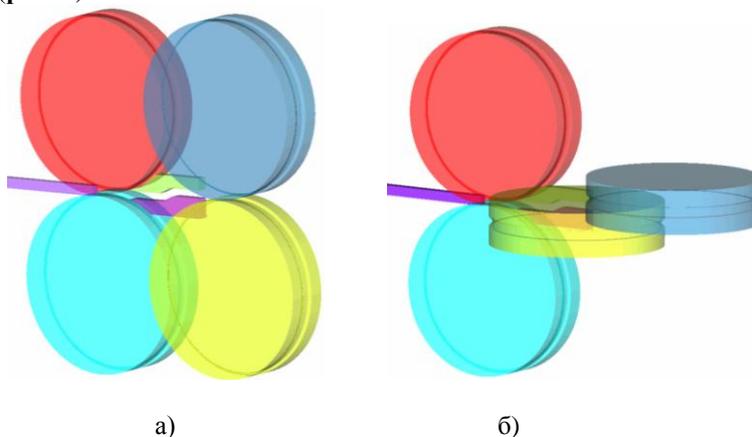
В нынешних условиях дефицита энергетических и сырьевых ресурсов весьма актуальна проблема энергосберегающих технологий, в том числе и при получении материалов со свойствами, сочетающими одновременно высокую прочность и пластичность.

Подобное уникальное сочетание свойств характерно для субультра- и ультрамелкозернистой (СУМЗ и УМЗ) формы структурного состояния материалов с преобладанием большеугловых межзеренных границ. Известные результаты применения СУМЗ материалов в машиностроительной и медицинской отраслях, показывают их большое будущее и спрос на изделия из таких материалов.

Однако рост спроса существенно ограничивается высокой стоимостью производства изделий из таких материалов, обусловленной высокой энерго- и трудоемкостью их производства. Наиболее распространенный и изученный метод получения СУМЗ и УМЗ – равноканальное угловое прессование (РКУП) [1], однако недостаток этого и многих других известных процессов состоит в их дискретности, т.е. невозможности обработки изделий относительно большой длины и в необходимости проведения большого числа циклов обработки.

Для решения задачи по внедрению в производство технологии получения СУМЗ материалов методами интенсивной пластической деформации (ИПД) нами была разработана совмещенная технология деформирования «прокатка - равноканальное угловое прессование», позволяющая получать прутки высокого качества с квадратным или прямоугольным сечением. В работах [2-5] были представлены всесторонние исследования данного процесса, показывающие его неоспоримые преимущества перед классическим РКУП. Однако из ряда работ [1, 6-7] известно, что для достижения размера зерна порядка $10^{-7} \div 10^{-9}$ м, необходимого для формирования СУМЗ структуры, требуется сообщить деформируемому металлу величину эквивалентной деформации $\epsilon > 3$. Для достижения такого уровня проработки требуется многоцикловая деформация. В частности, при реализации РКУП нужно не менее 9 циклов [8], а при осуществлении совмещенного процесса «прокатка - равноканальное угловое прессование» требуемое количество циклов сокращается и равно 6-7 [4, 5], что все еще велико. Поэтому дальнейшим направлением развития данного совмещенного процесса является поиск возможных схем реализации процесса, позволяющих сократить количество циклов деформирования, требуемых для получения СУМЗ структуры.

Одним из возможных вариантов этого процесса является использование универсальной клетки вместо двух горизонтальных (рис. 1).



а) б)
Рис. 1. Возможные варианты расположения валков в совмещенном процессе «прокатка-равноканальное угловое прессование»:
 а – с горизонтальными валками на выходе из матрицы;
 б – с вертикальными валками на выходе из матрицы

В этом случае заготовка при заталкивании в матрицу будет обжиматься по высоте, а на выходе из матрицы, попав во вторую клетку, будет вытягиваться из матрицы, получая обжатие по ширине. В данном случае изменение направления деформации имеет некоторую аналогию с маршрутом ВС [9], известным из ряда работ по РКУП. В нем при многопроходном прессовании направление деформации заготовки изменяется вдоль продольной оси на 90 градусов, что в предлагаемой схеме соответствует прокатке в вертикальных валках.

2. Начальная модель

Для подтверждения гипотезы об эффективности использования вертикальных валков вместо горизонтальных было проведено моделирование совмещенного процесса «прокатка – равноканальное угловое прессование» в программе DEFORM-3D. Начальные размеры заготовки были равны 20x15x350 мм. Условия и допущения, принятые при моделировании:

– материал заготовки до деформации является изотропным, в нем отсутствуют какие-либо напряжения и деформации;

– заготовка была разбита на 180 000 конечных элементов, со средней длиной ребра элемента 0,5 мм;

– начальная температура заготовки была равна 1150 °С, также учитывался деформационный разогрев и теплопередача от заготовки к инструменту и в окружающую среду;

– инструмент был принят как абсолютно жесткое тело;

– модель заготовки была принята как упруго-пластическая;

– материал заготовки - AISI 1015, соответствующий стали 15;

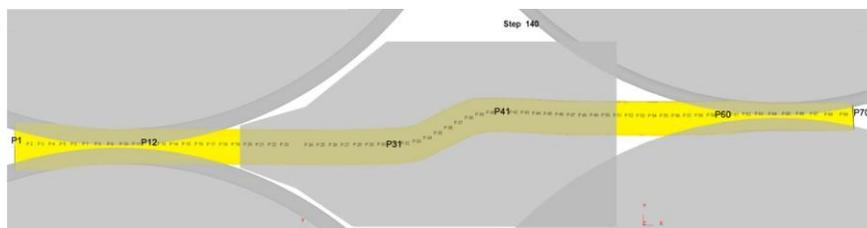
– коэффициенты трения были приняты в соответствии с рекомендациями из работы [2] - на контакте заготовки и валков – 0,5; на контакте заготовки и матрицы – 0,1;

– скорость вращения валков была равна 60 об/мин.

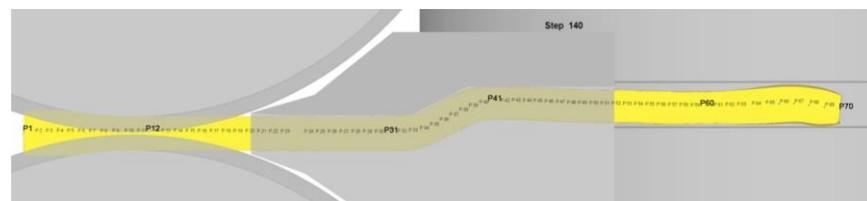
После расчета обеих моделей на заготовке было создано 70 точек по продольной оси с шагом 5 мм, по которым проводились замеры параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) (рис. 2). Для анализа была выбрана стадия процесса, когда заготовка одновременно прокатывается в обеих парах валков.

Условно заготовку можно разделить на следующие зоны:

1. Зона прокатки в первой паре валков (точки 1÷12).
2. Расстояние между зонами прокатки в 1-ой паре валков и стыков каналов в матрице (точки 13÷31).
3. Зона стыка каналов в матрице (точки 32÷41).
4. Расстояние между зонами стыков каналов в матрице и прокатки во 2-ой паре валков (точки 42÷60).
5. Зона прокатки во второй паре валков (точки 61÷70).



а)



б)

Рис. 2. Расположение точек для анализа параметров НДС

Поскольку изучаемые модели отличаются лишь расположением в пространстве второй пары валков, логично будет предположить, что значения параметров будут иметь различия только в последней зоне, в остальных же они будут идентичными.

3. Напряженное состояние

Для анализа напряженного состояния было решено использовать коэффициент Лоде-Надаи. Данный коэффициент позволяет провести оценку природы деформации, возникающей в заготовке, т.е. определить, какой тип деформации реализуется в конкретной точке – растяжение, сжатие или сдвиг.

Расчет коэффициента Лоде-Надаи ведется по формуле

$$\mu = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (1)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения, МПа.

Величина коэффициента варьируется от -1 до 1. Значение от 0 до 1 соответствует сжатию; от 0 до -1 соответствует растяжению; значение коэффициента, стремящееся к 0, соответствует сдвигу [10].

При расчете коэффициента Лоде-Надаи были получены следующие результаты (рис. 3). Как и предполагалось, результаты в первых трех зонах оказались полностью идентичными. В первой зоне при прокатке присутствуют как области сжатия ($\mu = 0,6 \div 0,9$), так и области растяжения ($\mu = -0,6 \div -0,8$), что является результатом особенности формирования очага деформации при прокатке, в котором имеются зоны отставания и опережения. Аналогичные результаты были получены и в последней зоне при прокатке во второй паре валков. Во второй зоне, на всей ее протяженности развивается деформация сжатия ($\mu = 0,95 \div 1$), что является следствием подпора со стороны наклонного канала матрицы. В третьей зоне при прохождении заготовки через каналы матрицы, в деформируемом металле развиваются два типа деформации: сжатие ($\mu = 0,6 \div 0,85$) и сдвиг ($\mu = 0 \div 0,2$), что является наиболее благоприятной схемой для измельчения исходного зерна.



Рис. 3. Коэффициент Лоде-Надаи

Наиболее интересными являются значения коэффициента Лоде-Надаи, полученные в 4-ой зоне, характеризующей расстояние между зонами стыков каналов в матрице и прокатки во 2-ой паре валков. Здесь значения коэффициента Лоде-Надаи при использовании горизонтальных и вертикальных валков имеют существенные различия. Это объясняется кинетикой и формоизменением заготовки при попадании во вторую пару валков. При наличии второй пары горизонтальных валков заготовка получает повторное обжатие по высоте, при этом требуемая величина обжатия для стабильного протекания процесса значительно меньше, чем в первой паре валков. Вследствие этого заготовка получает значительно меньшую величину уширения. В результате в четвертой зоне развиваются преимущественно растягивающие напряжения ($\mu = -0,6 \div -0,8$), что является негативным фактором.

При наличии на выходе из равноканальной ступенчатой матрицы пары вертикальных валков заготовка получает второе обжатие по ширине, величина которого соизмерима с обжатием в первой паре валков. Как следствие, в четвертой зоне возникает подпор со стороны валков, тем самым растягивающие напряжения значительно снижаются, вплоть до возникновения зон сжатия ($\mu = -0,3 \div 0,3$).

4. Деформированное состояние

Для анализа деформированного состояния был использован такой показатель, как эквивалентная деформация, который в ряде работ именуется как интенсивность деформации. Данный параметр позволяет провести оценку общего уровня накопленной деформации на любой стадии процесса.

Эквивалентная деформация определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - главные деформации.

В результате изучения данного параметра были получены результаты, представленные на **рис. 4**. При сравнении моделей с горизонтальными и вертикальными валками было установлено, что на первых четырех зонах значения эквивалентной деформации являются идентичными. Разница в значениях появляется лишь в последней зоне, где из-за изменения направления обжатия, в вертикальных валках существенно повышается уровень проработки, тем самым значение эквивалентной деформации повышается: от $0,55 \div 0,8$ в горизонтальных валках до $0,9 \div 1,15$ в вертикальных валках.

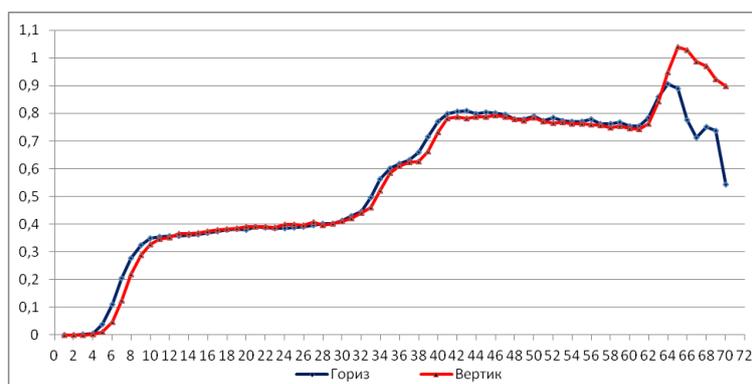


Рис. 4. Эквивалентная деформация

5. Заключение

В данной работе был проведен сравнительный анализ эффективности использования горизонтальных и вертикальных валков в ходе реализации совмещенного процесса «прокатка – равноканальное угловое прессование». Сравнение проводилось на основе изучения НДС обоих вариантов при помощи компьютерного моделирования в программе DEFORM-3D, работающей на основе метода конечных элементов. Для анализа напряженного состояния был использован коэффициент Лодэ-Надаи, позволяющий определить тип деформации, реализующийся в конкретной точке – растяжение, сжатие или сдвиг. Для анализа деформированного состояния был использован такой показатель, как эквивалентная деформация, который позволяет провести оценку общего уровня накопленной деформации. В ходе сравнительного анализа параметров НДС было выявлено, что использование вертикальных валков на выходе из матрицы в ходе осуществления совмещенного процесса «прокатка – равноканальное угловое прессование», позволяет добиться более благоприятной картины распределения НДС в металле.

Список литературы

1. Валиев Р., Александров И. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига, 2007. 398 с.
2. E. Panin, S. Lezhnev, A. Naizabekov, T. Koinov, Theoretical grounds of the combined “rolling – equal-channel step pressing” process. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 51, 5, 2016. Pp. 594-602.
3. S.N. Lezhnev, A.B. Naizabekov, Ye.A. Panin, Theoretical studies of the joint "extrusion-rolling" process aimed at making sub-ultra fine - grained structure metal, 20th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (Metal 2011), May 18-20.2011, Brno, Czech Republic, 272-277.
4. S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina. Research of combined process “rolling-pressing” influence on the microstructure and mechanical properties of aluminium. Advanced Materials Research, 2013, Vol. 814, 68-75.
5. A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin, I. Volokitina, Influence of Combined Process “Rolling-pressing” on Microstructure and Mechanical Properties of Copper, Procedia Engineering, 2014, 81, 1499–1504.
6. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, Prog. Mater. Sci., 2006, 51, 881-981.
7. G.I. Raab. Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels, Mat. Sci. Eng., 2005, A 410–411, 230–233.
8. Z. Horita, D.J. Smith, M. Furukawa, M. Nemoto, R. Valiev, T. Langdon. J Mater Res 11, 8, 1880-1890 (1996).
9. R. Valiev, R. Islamgaliev, I. Alexandrov. Prog Mater Sci 45, 2, 103-189 (2000).
10. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И., Павлик Д.А., Малышев В.Ф. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.

ПРОЧНОСТЬ И ПРЕДЕЛЬНАЯ НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Колмогоров Г.Л., Акулова А.А.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия

В настоящее время все более широкое применение при строительстве высотных зданий и сооружений находят трубобетонные колонны, состоящие из наружной оболочки (стальной трубы), заполненной высокопрочным бетоном [1]. Применение трубобетонных колонн позволяет возводить строительные сооружения с более низкими трудозатратами.

Стальная оболочка в виде трубы играет роль и опалубки, и арматуры, повышая несущую способность, что позволяет возводить колонны зданий и сооружений с высокой производительностью и более низкими затратами. Кроме технологических преимуществ, трубобетонные колонны обладают повышенной несущей способностью и сейсмостойкостью [2].

Целью работы является оценка предельной несущей способности и деформативности стальных трубобетонных колонн при действии осевой нагрузки.

На **рис. 1** приведено сечение трубобетонной колонны, состоящей из оболочки с наружным радиусом R_1 и бетонного сердечника радиусом R_0 . При действии осевого сжимающего усилия в сечениях трубобетонной колонны реализуется осесимметричное напряженно-деформированное состояние, поэтому при расчете несущей способности используется математический аппарат теории упругости для сердечника и аппарат механики и оболочек наружной части колонн.

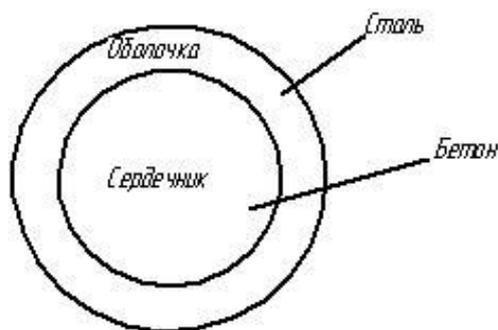


Рис. 1. Сечение трубобетонной колонны

Деформация центральной части трубобетонной колонны описывается следующим дифференциальным уравнением для осесимметричного тела в цилиндрической системе координат [3]

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (u * r) \right] = 0, \quad (1)$$

где u – деформация в радиальном направлении.

Решение данного дифференциального уравнения имеет вид

$$u = c_1 \frac{r}{2} + \frac{c_2}{r}, \quad (2)$$

где c_1 и c_2 – постоянные интегрирования.

Из соотношения (2) следуют бесконечно большие перемещения при $r = 0$, поэтому полагаем, что c_2 и уравнение (2) принимает вид

$$u = c_1 \frac{r}{2}. \quad (3)$$

При известных перемещениях и напряжениях состояние характеризуется следующими уравнениями теории упругости для радиальных и окружных (тангенциальных) напряжений в сердечнике

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E_{\bar{\sigma}}}{1-\mu_{\bar{\sigma}}^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right) + \frac{\mu_{\bar{\sigma}}}{1-\mu_{\bar{\sigma}}} \sigma_z; \\ \sigma_t &= \frac{E_{\bar{\sigma}}}{1-\mu_{\bar{\sigma}}^2} \left(\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right) + \frac{\mu_{\bar{\sigma}}}{1-\mu_{\bar{\sigma}}} \sigma_z, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где σ_z – нормальные напряжения, действующие в направлении оси трубобетонной колонны; $E_{\bar{\sigma}}$, $\mu_{\bar{\sigma}}$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона, заполняющего центральную часть колонны бетона, соответственно.

Подставляя выражение (2) в уравнение, получим после преобразований равенство и постоянство по сечению радиальных и тангенциальных напряжений

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{1}{1-\mu_{\bar{\sigma}}} \left(E_{\bar{\sigma}} \cdot \frac{c_1}{2} + \mu_{\bar{\sigma}} \sigma_z \right). \quad (5)$$

Осевое напряжение σ_z определяется из условий восприятия части нагрузки центральной частью колонны. Для этого определим общую относительную осевую деформацию колонны под действием осевого усилия

$$\varepsilon_z = -\frac{P}{\pi R_1^2 E_{np}}, \quad (6)$$

где P – действующее осевое усилие; πR_1^2 – площадь сечения трубобетонной колонны; E_{np} – приведенный модуль упругости.

Знак минус в соотношении (6) означает, что под действием усилия P в колонне возникают осевые деформации сжатия.

Следует отметить, что трубобетонная колонна представляет собой трансверсальный - изотропный композит, к которым относят композиты, обладающие симметрией свойств в плоскости перпендикулярной оси композита [4].

Приведенный модуль упругости трансверсально-изотропного композита с достаточно высокой точностью определяется по правилу смеси

$$E_{np} = E_{\bar{\sigma}} c + E_{mp} (1 - c), \quad (7)$$

где c – объемное содержание бетона; E_{mp} – модуль упругости материала трубы.

Осевая деформация приводит ε_z к появлению осевых напряжений в бетоне, которые определяются законом Гука

$$\sigma_z^{\bar{\sigma}} = E_{mp} \varepsilon_z = -\frac{P}{\pi R_1^2} \cdot \frac{E_{\bar{\sigma}}}{E_{np}}, \quad (8)$$

соответственно, осевые напряжения в трубе равны

$$\sigma_z^{mp} = E_{mp} \varepsilon_z = -\frac{P}{\pi R_1^2} \cdot \frac{E_{mp}}{E_{np}}. \quad (9)$$

При этом напряженное состояние в бетоне определяется по формуле

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{1}{1-\mu_{\bar{\sigma}}} \left(\frac{E_{\bar{\sigma}}}{2} c_1 - \mu_{\bar{\sigma}} \frac{P}{\pi R_1^2} \bar{E}_{\bar{\sigma}} \right), \quad (10)$$

где $\bar{E}_{\bar{\sigma}} = \frac{E_{\bar{\sigma}}}{E_{mp}}$ – относительный модуль упругости бетона.

Входящую в соотношение (10) постоянную интегрирования c_1 определим из равенства радиальных перемещений на контакте бетон-труба. Труба при этом рассматривается как цилиндрическая оболочка, находящаяся под действием радиального напряжения σ_r в бетоне и осевого напряжения σ_z .

Оболочка-труба под осевой нагрузкой не испытывает действия изгибающих моментов и рассматривается по безмоментной теории оболочек, усилия при этом определяются из уравнения [5]

$$\frac{N_z}{r_1} + \frac{N_t}{r_2} = Z, \quad (11)$$

где N_z и N_t – усилия в направлении оси труба-оболочка и окружном направлении, соответственно; r_1 и r_2 – радиусы кривизны оболочки в этих же направлениях; Z – внешняя радиальная нагрузка, равная радиальному напряжению в бетоне на контакте бетон-труба.

Для цилиндрической оболочки $r_1 = \infty$ радиус в окружном направлении равняется внутреннему радиусу трубы $r_2 = R_0$. С учетом данных радиусов уравнение (11) упрощается и принимает вид

$$N_t = zR_c. \quad (12)$$

При этом в трубе действуют окружные напряжения

$$\sigma_t = \frac{N_t}{h} = z \frac{R_0}{h}, \quad (13)$$

что после подстановки значения $z = \sigma_r$ из выражения (10) дает

$$\sigma_t = \frac{1}{1 - \mu_\sigma} \left(\frac{E_\sigma}{2} c_1 - \mu_\sigma \frac{P}{\pi R_1^2} \bar{E}_\sigma \right) \frac{R_0}{h}, \quad (14)$$

где $\bar{E}_\sigma = \frac{E_\sigma}{E_{mp}}$.

В трубе-оболочке реализуется плоское напряженное состояние. Кроме окружного напряжения (14) действует сжимающее напряжение σ_z , определяемое соотношением (8).

Для плоского напряженного состояния, реализуемого в трубе-оболочке, относительная деформация в окружном направлении определяется законом Гука

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_{mp}} (\sigma_t - \mu_{mp} \sigma_z), \quad (15)$$

где μ_{mp} – коэффициент Пуассона материала трубы.

После подстановки соотношений (13), (14) для напряжений σ_t и σ_z в уравнение (15) и преобразований получим

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_{mp}} \left[\frac{1}{1 - \mu_\sigma} \left(E_\sigma \frac{c_1}{2} - \mu_\sigma \frac{P}{\pi R_1^2} \bar{E}_\sigma \right) \frac{R_0}{h} + \mu_{mp} \frac{P}{\pi R_1^2} \bar{E}_{mp} \right], \quad (16)$$

где $\bar{E}_{mp} = \frac{E_{mp}}{E_{np}}$ – относительный модуль упругости трубы; E_{mp} – модуль упругости материала трубы.

Относительная окружная деформация в соответствии с теорией оболочек равна [5]

$$\varepsilon_t = \frac{u_{mp}}{R_0}, \quad (17)$$

где u_{mp} – радиальное перемещение (прогиб) оболочки-трубы.

Из данного соотношения следует

$$u_{mp} = \varepsilon_t R_0. \quad (18)$$

Радиальная деформация (18) должна быть равна радиальной деформации бетона на контакте бетонный сердечник-оболочка в форме трубы $u_{mp} = u_{\delta}$. При этом радиальная деформация бетона определяется соотношением (3)

$$u_{\delta} |_{r=R_0} = c_1 \frac{R_0}{2}. \quad (19)$$

Определив ε_t в соответствии с соотношением (16), учитывая (18) и (19), после преобразований и упрощений получим c_1 в следующем виде

$$c_1 = \frac{2PE_{mp}}{\pi R_1^2 E_{np} E_{\delta}} \cdot \frac{\mu_{\delta}}{\mu_{mp}}. \quad (20)$$

Подставив полученное значение c_1 в соотношение (10), имеем

$$z = \sigma_r = \frac{\mu_{\delta}}{\mu_{mp}(1-\mu_{\delta})} \cdot \frac{P}{\pi R_1^2} (\bar{E}_{mp} - \mu_{mp} \bar{E}_{\delta}). \quad (21)$$

В соответствии с соотношением (21) получим

$$\sigma_t = \frac{\mu_{\delta}}{\mu_{mp}(1-\mu_{\delta})} \cdot \frac{P}{\pi R_1^2} (\bar{E}_{mp} - \mu_{mp} \bar{E}_{\delta}) \frac{R_0}{h}. \quad (22)$$

Прочность трубы-оболочки определяется значениями окружных напряжений. При достижении σ_t предела прочности материала трубы на растяжение произойдет разрушение оболочки-трубы от окружных напряжений. Приравняв $\sigma_t = \sigma_b$ (σ_b – предел прочности материала трубы на растяжение), получим предельную несущую способность трубобетонной колонны

$$P_{np} = \frac{\pi R_1^2 \mu_{mp} (1 - \mu_{\delta}) \sigma_b}{\mu_{\delta} (\bar{E}_{mp} - \mu_{mp} \bar{E}_{\delta})} \cdot \frac{h}{R_0}. \quad (23)$$

Формулу (23) можно несколько упростить, полагая $\frac{R_1}{R_0} \approx 1$

$$P_{np} = \frac{\pi R_1 \mu_{mp} (1 - \mu_{\delta}) h}{\mu_{\delta} (\bar{E}_{mp} - \mu_{mp} \bar{E}_{\delta})} \sigma_b. \quad (24)$$

На **рис. 2** приведены расчетные значения несущей способности трубобетонной колонны $R_0 = 0,5$ м, $R_1 = 0,51$ м для трех марок бетона. Упругие характеристики, принятые в расчете, приведены в **таблице**.

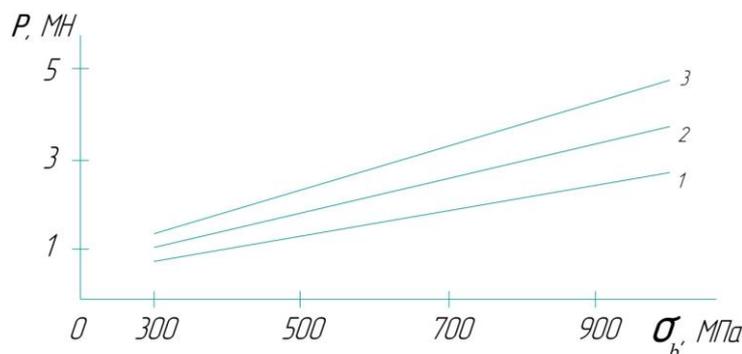


Рис. 2. Несущая способность трубобетонных колонн:
1 – Бетон М200, 2 – Бетон М350, 3 – Бетон М450

Из рис. 2 видно, что с увеличением предела прочности стальной трубы и применением более качественного бетона приводит к повышению несущей способности трубобетонной колонны.

**Значения физических констант
для компонентов композита**

Физические константы	Сталь	Бетоны		
		M200	M350	M400
Модуль упругости, $E, 10^4$ МПа	20	2	3	4
Коэффициент Пуассона, μ	0,33	0,2	0,2	0,2

Для принятых размеров трубобетонных колонн объемная доля сердечника составляет $c = 0,96$. Приведенные модули упругости при этом, соответственно, равны

$$E_{np1} = 2,72 \cdot 10^4 \text{ МПа};$$

$$E_{np2} = 3,68 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_{np3} = 4,64 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

Относительные модули упругости для бетона при этом равны

$$\bar{E}_{\sigma 1} = 0,1; \bar{E}_{\sigma 2} = 0,15; \bar{E}_{\sigma 3} = 0,2.$$

Соответственно, для трубы имеем

$$\bar{E}_{mp1} = 7,3529; \bar{E}_{mp2} = 5,4347; \bar{E}_{mp3} = 4,31.$$

Таким образом, на основании математического аппарата механики сплошных сред из условий прочности определена несущая способность трубобетонных колонн.

Список литературы

1. Кришан А.Л., Кришан М.А., Сабиров Р.Р. Перспективы применения трубобетонных колонн на строительных объектах России // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1(45). С. 137-140.
2. Колмогоров Г.Л., Путилова Е.М., Сайгина Л.С. Несущая способность трубобетонных колонн под действием осевых усилий // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 4. С. 8-10.
3. Хан Х.Г. Теория упругости и основы линейной теории. Её применение. М.: Мир, 1988. 343 с.
4. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. Пер. с англ. / Р. Кристенсен. М.: Мир. 1982. 334 с.
5. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.
6. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1968. 269 с.

УДК 621.762.4.04

**ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ
КОНСТРУКЦИИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Босикова Е.Ю., Полякова М.А., Барышников М.П.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

В условиях рыночной экономики качество металлопродукции является одним из важнейших аспектов, определяющих ее конкурентоспособность на рынке. При этом наиболее приемлемой для развития металлургического производства и повышения эффективности при проведении различного рода реконструкций, либо модернизаций предприятий становится концепция освоения «глобального рынка» сбыта собственной продукции. В связи с этим, на первый план выступают вопросы, связанные с необходимостью обеспечивать и

поддерживать стабильно высокие показатели качества широкого размерно-марочного сортамента выпускаемой металлопродукции [1–5].

Качество металлопродукции зависит не только от технических и технологических решений, реализованных на производственных операциях, но и закладывается еще на этапе производства стали [6, 7]. Одним из эффективных способов обеспечения высокого качества металла является внепечная обработка стали. Среди существующих методов внепечной обработки расплава использование порошковой проволоки занимает особое место. Технология внепечной обработки металлургических расплавов порошковыми проволоками с различными наполнителями применяется в СНГ около 20 лет. Анализируя пройденный этап, можно отметить следующее. Порошковая проволока предназначена для внепечной обработки расплавов: для легирования, модифицирования, раскисления, десульфации, а также для доводки по химическому составу и температуре [8]. Технология обработки стали порошковой проволокой имеет ряд преимуществ, особенно при использовании элементов, введение которых в сталь затруднено по ряду причин: низкая плотность (Ca, Mg, C, B, Si, S, Se); низкая растворимость в жидкой стали (Pb, Ca, Mg); низкая температура плавления (S, Se, Pb, Bi, Mg, Al, Ce, Ca) и кипения (S, Se, Mg, Ca), а также высокая упругость пара (Mg, Ca, Se, Te) и высокое сродство к кислороду (Ca, Mg, Ce, Zr, Al, Ti, Si, Nb). В последнее время с развитием технологий получения автолиста нового поколения порошковая проволока применяется для процессов прямого микролегирования стали ниобием и ванадием из смеси оксидов и восстановителей [9].

Порошковая проволока состоит из наполнителя и металлической оболочки (рис. 1).

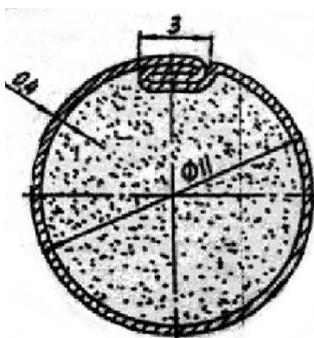


Рис. 1. Сечение порошковой проволоки

В качестве наполнителя используют достаточно однородные по составу смеси и отдельные материалы с размером частиц не более 2,5 мм, а в качестве металлической оболочки – холоднокатаную ленту из стали марки 08кп толщиной 0,4–0,5 мм и шириной 45–65 мм [9].

Стальная оболочка выполняет несколько важных функций:

- предохраняет от окисления легирующие элементы при прохождении через слой шлака на поверхности металла;
- защищает порошкообразные реагенты от воздействия атмосферы и влаги во время хранения и транспортировки;
- обеспечивает соответствующую жесткость проволоки, необходимую для прохождения шлакового слоя;
- задерживает непосредственный контакт реагентов с жидкой сталью.

Порошковая проволока вводится в жидкий металл с регулируемой скоростью с помощью трайб-аппаратов (рис. 2) [10].

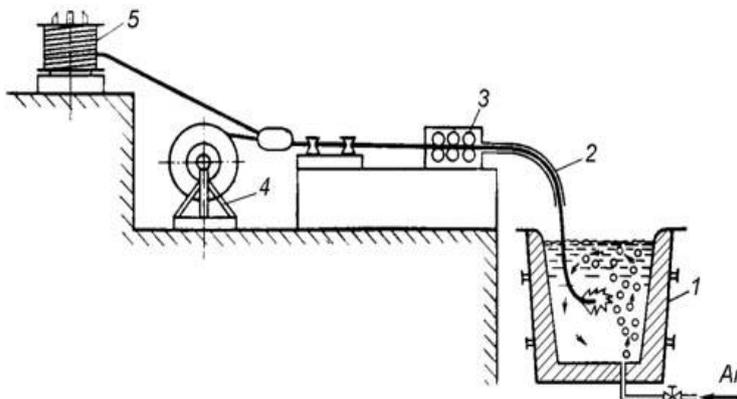


Рис. 2. Схема ввода порошковой проволоки в сталеразливочный ковш:

- 1 – ковш; 2 – направляющая труба; 3 – трайб-аппарат;
4 – разматывающее устройство; 5 – бухта порошковой проволоки

Технология изготовления порошковой проволоки заключается в непрерывном профилировании холодной ленты в роликовых волокнах и одновременное заполнение ее порошком-наполнителем с последующим формированием замка, редуцированием и смоткой готовой продукции в бухты (рис. 3) [11].

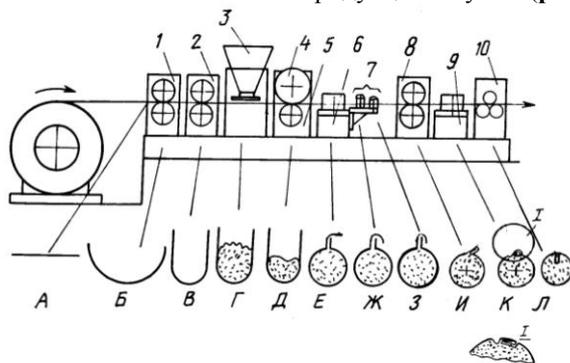


Рис. 3. Схема формирования проволоки с фальцевым швом

В группе горизонтальных рабочих клеток 1-2 формующего стана исходной ленте (позиция А) последовательно придается форма U-образного желоба (позиции Б, В), в который посредством дозатора 3 со стороны низкой вертикальной стенки засыпается порошковый наполнитель (позиция Г), после чего заготовка попадает в валки 4 устройства 5, где порошок разравнивается и уплотняется. Затем желоб с порошком (позиция Д) заходит в валки вертикальной клетки 6 и сворачивается в трубчатую заготовку (позиция Е) с отбортовкой краев желоба под замковое соединение. Заготовка поступает в роликовое устройство 7 для закрытия замка, где с помощью горизонтальных и вертикальных калиброванных роликов осуществляется окончательное закрытие замка (позиции Ж, З). В вертикальной клетке 8 верхняя часть замка подгибается (позиция И) для более плотного прилегания наклоненного замка к профилю а последней горизонтальной клетки 9 с образованием г-образного замкового соединения в виде лежачего фальцевого шва и гофра, прилежащего к шву (позиция К). Гофр препятствует раскрытию замкового соединения при последующем редуцировании порошковой заготовки в блоке 10 трехвалковых клеток (позиция Л). Каждый трехвалковый круглый калибр позволяет уменьшать диаметр заготовки до 5 %; при большем обжатии возможно раскрытие фальцевого шва из-за значительного уменьшения периметра заготовки. Принятая U-образная форма желоба с разновысотными стенками надежно заполняется шихтой, падающей сверху из дозатора со стороны низкой стенки, позволяет уплотнять порошок по всей ширине желоба, а также ведет себя устойчиво при деформации в вертикальных валках, образующих трубчатое сечение [11].

В ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» для производства конкурентоспособной на рынке металлопродукции существует необходимость совершенствования конструкции порошковой проволоки. Рассмотрим ряд эффективных технических решений, которые позволяют улучшить эксплуатационные свойства порошковой проволоки и не требуют значительных затрат на модернизацию.

Для изготовления порошковой проволоки, а также для формирования её в удобные для поставки и применения бухты предлагается [12] изменить конструкцию шва. Для формирования такой проволоки с фальцевым швом необходимо 11 калибров (рис. 4).

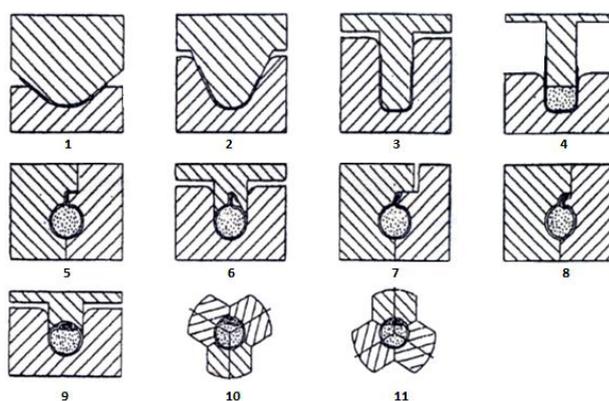


Рис. 4. Калиброванные валки формовочного стана (1-11 – номера калибров)

В калибрах 1-3 из ленты формируется U-образный желоб с разновысотными стенками. В калибре 4 порошок разравнивается и уплотняется, а в калибре 5 сворачивается трубчатая заготовка. В калибре 6 происходит подгибка отбортованного края на 40-50 град. В калибре 8 формируется овальное сечение, а также производится подгибка верхней части фальцевого шва до угла 5-10 град. Калибр 9 из овала формирует круглое сечение заго-

товки, а калибры 10, 11 редуцируют ее до заданного диаметра порошковой проволоки. Калибры 5, 7 и 8 образуются вертикальными валками, калибры 10 и 11 являются трехвалковыми и повернуты один относительно другого на 60 град. Все остальные калибры образованы горизонтальными валками [12, 13].

Данный способ имеет ряд преимуществ [12]:

- исключение формирования асимметричной отбортовки краев ленты в черновых проходах и применение специального устройства для формирования замкового соединения существенно упрощают калибровку валков формирующих клетей стана;

- сокращается число рабочих (формирующих) клетей с 6 до 4. Применение регулируемого устройства для формирования и закрытия замкового соединения, а также создание продольного гофра, прилежащего параллельно замковому соединению, значительно повышает качество и надежность трубчатой замковой проволоки;

- повышается на 20-25 % коэффициент заполнения профиля порошковым наполнителем. Редуцирование трубчатой заготовки протягиванием через калибры сдвоенной трехроликовой клетки позволяет из одной исходной ленты без изменения калибровки валков формирующих клетей получать несколько смежных размеров проволоки, что существенно сокращает затраты на расширение парка калибровочных валков и подготовки исходных лент различной ширины.

Другой проблемой использования порошковой проволоки является ее преждевременное разрушение в расплаве металла. Если оболочка порошковой проволоки разрушается слишком рано в результате быстрого расплавления сразу после проникновения в металлическую ванну, и содержимое проволоки высвобождается вблизи поверхности ванны, это может привести к тому, что вещество, содержащееся в порошковой проволоке, не вступит в контакт с плавающим на поверхности шлаком и будет, таким образом, утрачено. Или, например, массовое высвобождение кальция на небольшой глубине в ванне жидкого металла вызывает бурную реакцию и выбросы жидкого металла, что может привести к несчастным случаям. Также, если глубина проникновения проволоки является слишком маленькой, существует вероятность неравномерного распределения компонентов, содержащихся в ней.

Другим возможным вариантом совершенствования конструкции порошковой проволоки является использование оболочки, которая, сгорая и не оставляя при этом нежелательных зольных остатков, на короткое время замедляет распространение тепла в направлении середины проволоки, причем эта оболочка выполнена из бумаги пиротехнического назначения, являющейся горючей и теплоизолирующей [14]. Таким образом, увеличивая количество слоев этой бумаги, можно выиграть дополнительное время для введения порошковой проволоки в более глубокие слои расплава, тем самым избежать выброса жидкого металла, выделения дымов и повысить эффективность операции введения добавок с помощью порошковой проволоки. Также поверхность оболочки из пиротехнической бумаги размещают металлический защитный слой, с тем, чтобы избежать повреждения слоев пиротехнической бумаги во время наматывания и разматывания порошковой проволоки на катушку. Конструкция такой проволоки представлена на **рис. 5, а**. Причем, пиролизующийся слой располагается так, чтобы избежать контакта металл – металл. На **рис. 5, б** показана проволока, в которой пиротехнический слой находится с внутренней стороны металлической оболочки. Такой вариант реализации не совсем целесообразен, ввиду тех факторов, что защищать от теплового воздействия необходимо именно внешнюю оболочку.

Техническая реализация данного способа представляет собой включение дополнительного блока в производственную линию, с помощью которого будет осуществляться формирование защитного слоя, состоящего из пиротехнической бумаги и тонкого металлического листа. Данный блок представляет собой агрегат спиральной навивки бумаги с последующей группой клетей, формирующих защитную металлическую оболочку. В качестве оборудования для навивки бумаги возможно использование оборудования для производства картонных шпудль. Причем данная технология совместима со всеми конструкциями порошковых проволок и оборудованием для их производства.

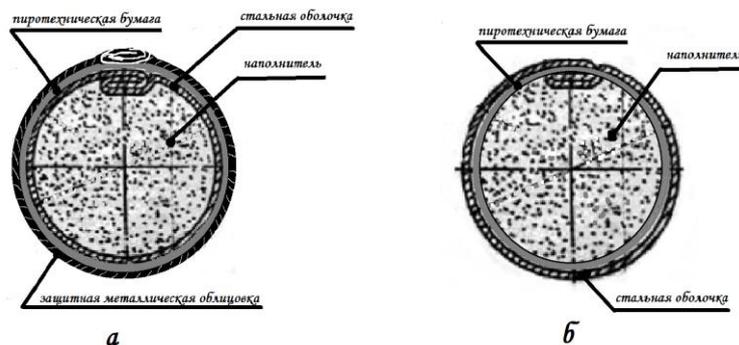


Рис. 5. Сечение порошковой проволоки с защитным пиротехническим слоем:

- а** - защитный слой снаружи металлической оболочки;
- б** - защитный слой прикреплен к внутренней поверхности стальной оболочки

Таким образом, реализация предлагаемых технических решений на практике является недорогим и надежным способом решения ряда практических проблем, связанных не только с производством порошковой проволоки, но и с ее применением при внепечной обработке.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор № 02.G25.31.0178 от 01.12.2015 г.), проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (Договор № 11.1525.2014К от 18.07.2014 г.), а также при финансовой поддержке РФФИ (№ 16-38-00619 мол_а).

Список литературы

1. Научно-педагогическая школа Магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, И.Г. Гун, Г.Ш. Рубин // *Качество в обработке материалов*. 2014. № 1(45). С. 5-9.
2. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, Г.Ш. Рубин, А.А. Минаев, А.Б. Назайбеков, Х. Дья // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 92-97.
3. Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2012. 164 с.
4. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 63-69.
5. Голубчик Э.М. Адаптивные подходы к управлению качеством продукции в многовариантных технологических системах // *Методы менеджмента качества*. 2013. № 7. С. 36-41.
6. Корчунов А.Г. К вопросу обеспечения качества продукции в технологиях метизного производства // *Металлург*. 2008. № 10. С. 67-72.
7. Корчунов А.Г. Совершенствование методики управления качеством продукции в технологических процессах метизного производства // *Производство проката*. 2008. № 12. С. 8-13.
8. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Павлюченков И.А., Болотов В.Ю. Прецизионная обработка металлургических расплавов. М.: Теплотехник, 2007. 424 с.
9. Каблукровский А.Ф. Внепечная обработка стали порошковой проволокой. М.: Metallurgizdat, 2006. 288 с.
10. Шкирмонтов А.П., Курагин О.В., Долбилов С.Б., Никифоров Б.А., Никулин А.Ю., Логийко Г.П. Технологические способы обработки жидкой стали порошковой проволокой. М., 1990. 27 с.
11. Есипов В.Д. Критерии качества порошковой проволоки для внепечной обработки стали // *Черная металлургия: Бюл. НТИ*. 2002. № 3. С. 37-39.
12. Патент 2086380 РФ. Способ изготовления порошковой проволоки для внепечной обработки стали и технологическая линия для его осуществления / Есипов В.Д., Мичурин Б.В., Грищенко В.М. Открытия. Изобретения. 1997. № 22. С. 17.
13. Есипов В.Д., Мичурин Б.В., Смирнов И.И. и др. Формовочный стан для производства порошковой проволоки с замковым соединением // *Черная металлургия: Бюл. НТИ*. 1998. № 8. С. 46-48.
14. Патент 2381280. Проволока с наполнителем. А. Пулальон. Оpubл. 10.02.2010.
15. Аксенова К.В., Барков Л.А., Барышников М.П., Бреда М., Валиев Р.З., Волокитина И.Е., Голубчик Э.М., Громов В.Е., Гун Г.С., Гундеров Д.В., Дельгадо Рейна С.Ю., Довженко Н.Н., Дроздова Т.Н., Дья Х.И., Емалева Д.Г., Ефимова Ю.Ю., Иванов Ю.Ф., Калляри И., Колокольцев В.М., Коновалов С.В. и др. Инновационные металлические материалы / под общ. ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 371 с.
16. Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А., Барышников М.П., Гун Г.С., Долгий Д.К., Ефимова Ю.Ю., Колокольцев В.М., Копцева Н.В., Куранов К.Ю., Лебедев В.Н., Мезин И.Ю., Полякова М.А., Чукин В.В. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Под общей редакцией М.В. Чукина. М.: Metallurgizdat, 2014. 276 с.
17. Актуальные проблемы квалитметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов // *Металлург*. 2014. № 4. С. 92-95.
18. Перспективы производства высокопрочного крепежа из заготовок из углеродистых сталей с ультрамелкозернистой структурой / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Г.Ш. Рубин, Н.В. Копцева, Г.С. Гун // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 1. С. 39-44.
19. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, Г.С. Гун, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефи-

- мова, Д.М. Чукин, А.Н. Матушкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 43-47.
20. Гун Г.С. Инновационные методы и решения в процессах обработки материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4 (48). С. 99-113.
21. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / M.V. Chukin, A.G. Korchunov, G.S. Gun, M.A. Polyakova, N.V. Koptseva // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. № 5 (45). Pp. 33-35.
22. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. Управление качеством в метизном производстве // Metallургические процессы и оборудование. 2013. № 4 (34). С. 106-111.
23. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, Г.С. Гун, Д.М. Закиров, И.Г. Гун // Черные металлы. 2012. № 7. С. 15-20.
24. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Черные металлы. 2012. № 12. С. 8-16.
25. Высокопрочная арматура для железобетонных шпал нового поколения / С.Н. Ушаков, М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 11. С. 25-27.
26. Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Стальная проволока: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.
27. Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П., Валиев Р.З., Рааб Г.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 1. С. 24-27.
28. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов технологического и эксплуатационного деформирования изделий с покрытиями: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 323 с.
29. Производство стальной проволоки: Монография / Белалов Х.Н., Клековкина Н.А., Клековкин А.А., Никифоров Б.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Зюзин В.И., Кулеша В.А., Савельев Е.В. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 543 с.
30. Создание и развитие теории квалиметрии металлургии / Гун Г.С., Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун И.Г., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. № 5. С. 67.
31. Зюзин В.И., Клековкина Н.А., Харитонов В.А., Барыкин Н.П., Барышев С.А., Галлямов Э.Ф., Дудин Д.А., Дудина Л.А., Евтеев Е.А., Ишбаева Л.М., Калугина Т.Ф., Клековкин А.А., Кулеша В.А., Незнаева Н.М., Петров В.П., Покачалов В.В., Портсман Ю.Н., Радионова Л.В., Радионов А.А. и др. Ресурсосбережение в метизном производстве (теория и практика работы Белорецкого металлургического комбината): Коллективная монография / Магнитогорск: МГТУ, 2001. 163 с.
32. Рубин Г.Ш., Гун Г.С., Пудов Е.А. Комплексная оценка качества стальной канатной проволоки // Сталь. 1983. № 1. С. 56.
33. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки давлением по комплексному критерию качества // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1982. № 8. С. 62.
34. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых автомобилей / И.Г. Гун, И.А. Михайловский, Д.С. Осипов, В.И. Куцепендик, В.В. Сальников, Е.И. Гун, А.В. Смирнов, А.В. Смирнов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 52-57.
35. Разработка процесса планетарно-поворотной обкатки / И.А. Михайловский, В.И. Куцепендик, Е.И. Гун, И.Г. Гун, В.В. Сальников // Metallургические процессы и оборудование. 2014. № 1 (35). С. 39-45.
36. Применение логики антонимов для комплексного анализа качества автомобильного крепежа / Д.М. Закиров, Д.С. Осипов, И.Г. Гун, А.В. Сабадаш, С.В. Овчинников, В.В. Майстренко, И.Ю. Мезин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4 (32). С. 57-62.
37. Гун И.Г., Михайловский И.А., Осипов Д.С. Квалиметрическая оценка и повышение результативности сквозной технологии и системы менеджмента качества производства шаровых пальцев: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 147 с.
38. Гун И.Г., Рубин Г.Ш., Сальников В.В., Артюхин В.И., Калмыков Ю.В., Левченко П.Е. Комплексная оценка эффективности процессов производства шаровых пальцев: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 133 с.
39. Комплексная оценка результативности сквозных технологий производства с использованием логики антонимов на примере шаровых пальцев / И.Г. Гун, И.А. Михайловский, Д.С. Осипов, В.В. Сальников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. Т. 1. № 9. С. 67-71.
40. Методика проведения и обработка результатов объединенных испытаний верхних шаровых пальцев передней подвески автомобилей ВАЗ 2101-2107 / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Лапчинский // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 4. С. 43.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ВЫСАДКИ ГОЛОВКИ БОЛТА¹

Малаканов С.А., Железков О.С., Арзамасцева В.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

В способах холодной объемной штамповки стержневых крепежных изделий на многопозиционных автоматах наибольшее распространение получили технологические процессы, включающие высадку бочкообразной головки за несколько переходов и обрезку головок [1-4] (рис. 1).



Рис. 1. Многопереходная технология изготовления болтов с шестигранной головкой

Одним из основных недостатков технологии изготовления болтов с шестигранной головкой, включающей обрезку головки заготовки, является образование отходов (облоя) в количестве 5-8 % от объема заготовки. Безоблойная штамповка шестигранных головок болтов не получила широкого применения по причинам плохого оформления (незаполнения) ребер многогранника, сложности инструмента и требования к высокой точности настройки штамповочного оборудования.

Известно, что для исключения появления дефектов поверхности на гранях шестигранника при обрезке, предварительная высаженная головка должна иметь цилиндрическую форму, диаметр цилиндрической головки должен быть немного больше диаметра описанной окружности шестигранника. Вследствие действия контактных сил трения между инструментом и заготовкой, последняя приобретает бочкообразную форму, что приводит к увеличению объема обрезаемого металла. Причем, чем выше возникающие силы трения, тем больше бочкообразность осаживаемой заготовки и вероятность появления трещин.

Предлагается использовать принцип, заложенный С.И. Губкиным [5], в эмпирическом способе определения коэффициента трения при осадке («метод конических бойков»). Сущность способа формирования головки заключается в том, что цилиндрический образец осаживается между пуансоном и матрицей с коническими торцевыми поверхностями с одинаковым углом образующей конуса. Сила трения будет задерживать течение металла от центра образца к периферии, а нормальное давление, наоборот, будет способствовать течению металла в этом направлении. Таким образом, при соблюдении определенных условий (угла конусности) заготовка при осадке сохранит цилиндрическую форму, что будет способствовать уменьшению отходов при обрезке головки.

Моделирование процесса осадки осуществляли в применявшейся ранее при исследовании многопереходных процессах пластической деформации [6] программе «DEFORM-3D», основанной на применении метода конечных элементов, при трехмерной постановке задачи. В расчете использовались три объекта: подвижный инструмент – верхний боек, неподвижный инструмент – нижний боек, заготовка. В силу симметричности сечения выполнялось моделирование 1/2 части заготовки цилиндрической формы, длина заготовки - 25 мм, диаметр заготовки - 9,75 мм. Были приняты следующие допущения: заготовка обладает упруго-пластическими свойствами; материал заготовки - сталь марки 10 (кривая упрочнения из справочника [7]); модуль упругости - $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона - $\mu = 0,3$; процесс изотермический; связь между поверхностной силой трения с силой нормальной реакции подчиняется закону Кулона-Амонтона; коэффициент трения скольжения f - постоянная величина равная 0,1.

Рассматривалось три варианта исполнения инструмента:

1. нижний и верхний бойки с плоскими рабочими поверхностями; 2. верхний боек с конической рабочей поверхностью, нижний – с плоской рабочей поверхностью; 3. нижний и верхний бойки с коническими рабочими поверхностями. Угол конусности α определялся по известной формуле [5]

$$\alpha = \arctan f = \arctan 0,1 = 5,71^\circ. \quad (1)$$

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00026 мол_а

На **рис. 2** показана деформация заготовки при различном исполнении инструмента. Из **рис. 2** видно, что наибольшую бочкообразность имеет заготовка, осаживаемая плоскими бойками, наименьшую – с бойками с конической поверхностью.

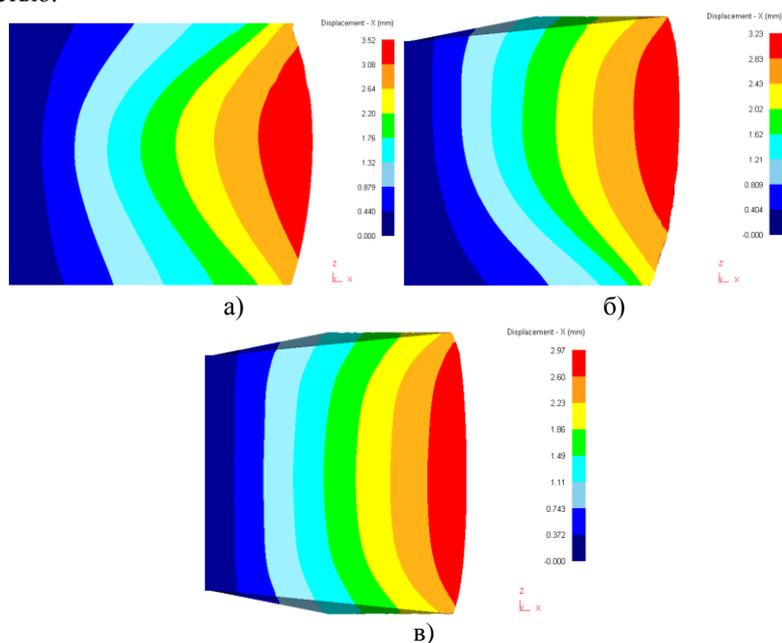


Рис. 2. Абсолютная деформация заготовки (в радиальном направлении):
 а) нижний и верхний бойки с плоскими рабочими поверхностями;
 б) верхний боек с конической рабочей поверхностью, нижний – с плоской;
 в) нижний и верхний бойки с коническими рабочими поверхностями

Применение конической формы рабочей поверхности при одинаковом перемещении подвижного инструмента ($\Delta h = 12$ мм) позволяет уменьшить бочкообразность на 8,04 и 15,63 %, соответственно.

Так как выполнение пуансона с конической поверхностью ограничивается условием обеспечения продольной устойчивости заготовки и качеством торцевой поверхности после отрезки заготовки, то было проведено моделирование процесса высадки головки с применением матрицы с конической рабочей поверхностью.

На **рис. 3** показан промежуточный этап процесса предварительной высадки головки болта с шестигранной головкой M12 с использованием матрицы с плоской и конической рабочей поверхностью.

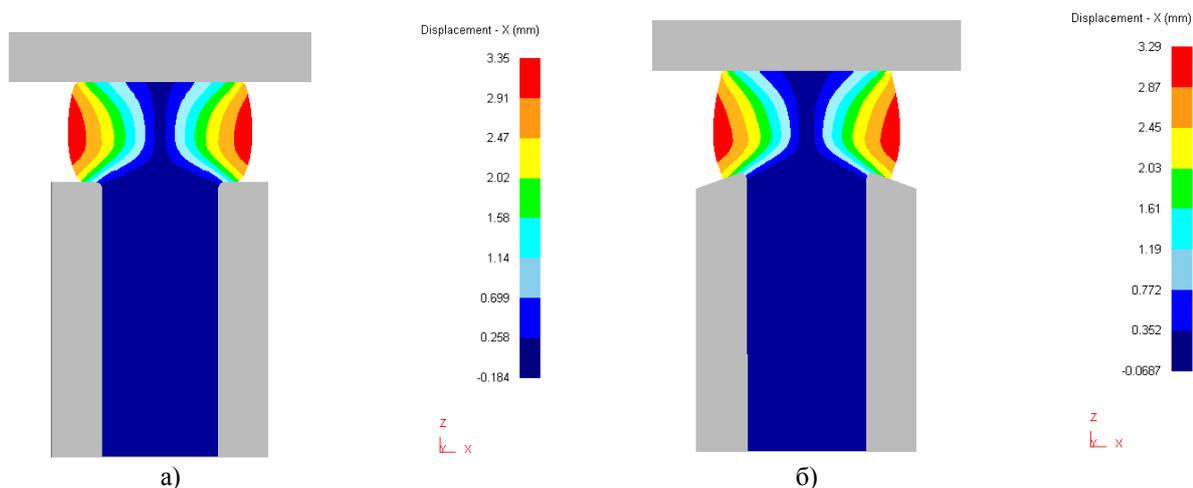


Рис. 3. Деформация заготовки при предварительной высадке головки болта:
 а) матрица с плоской рабочей поверхностью;
 б) матрица с конической рабочей поверхностью

Из **рис. 3** видно, что коническая рабочая поверхность матрицы обеспечивает меньшую бочкообразность головки, по сравнению с плоской поверхностью при равенстве диаметров головки в плоскостях прилегания к инструменту.

Адекватность результатов моделирования проверяли путем сопоставления результатов компьютерного и натурального моделирования. Численный эксперимент проводился в «DEFORM-3D» при соблюдении подобных условий.

Для проведения натурального эксперимента были изготовлены цилиндрические образцы из калиброванного круглого проката из стали марки 10 по ГОСТ 10702-78 диаметром 9,75 мм. Отрезку образцов проводили с помощью отрезного станка Discotom-6 «Struers» (Дания), обеспечивающего параллельность торцов.

Осадка образцов осуществлялась на гидравлическом испытательном прессе с ручным управлением ИП 2000 с наибольшей номинальной нагрузкой 2000 кН. На **рис. 4** показаны осажённые с различной степенью деформации образцы.



Рис. 4. Осажённые с различной степенью деформации образцы

Сравнивая результаты натурального и численного экспериментов, было установлено, что погрешность вычислений не превышает 9 %.

Таким образом, применение конической формы рабочего инструмента при предварительной высадке головки болта позволяет уменьшить бочкообразность заготовки, тем самым сократить отходы металла при обрезке на ~ 2 %.

Список литературы

1. Петриков В.Г. Прогрессивные крепежные изделия. М.: Машиностроение, 1991. 256 с.
2. Мокринский В.И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. М.: Металлургия, 1978. 72 с.
3. Навроцкий Г.А. Технология холодной объемной штамповки на автоматах. М.: Машиностроение, 1972. 96 с.
4. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
5. Железков О.С. Поиск рационального формоизменения в многопереходных процессах пластической деформации на основе комплексного критериального подхода // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. № 4. С. 8-12.
6. Основы теории обработки металлов давлением / С. И. Губкин [и др.]; под ред. М. В. Сторожева. М.: Машгиз, 1959. 540 с.
7. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник. М.: Машиностроение, 1980. 157 с.

УДК 621.771

К ВОПРОСУ КОНСТРУИРОВАНИЯ КАНАТОВ С УЧЕТОМ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Шубин И.Г., Шубина Н.И.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Стальной канат как гибкий элемент, способный нести высокую растягивающую нагрузку, широко применяется в современной подъемно-транспортной технике. Сейчас трудно себе представить работу многих важ-

нейших отраслей хозяйства без широкого использования стальных канатов. Прежде всего, это относится к горнодобывающей промышленности, где канат является единственным элементом, на который возложена вся работа по доставке полезных ископаемых из земных глубин. Работа каната и связанных с ним механизмов во многом зависят от правильности его конструктивного использования согласно с условиями эксплуатации и точности расчета на прочностные характеристики.

Удовлетворение потребности промышленности в стальных канатах должно идти не только по пути дальнейшего увеличения объема производства, но и в значительной степени за счет повышения их долговечности путем увеличения выпуска канатов прогрессивных типов и конструкций (с линейным касанием, фасоннопрядных, закрытых), разработки новых и модернизации действующих технологических процессов.

Повышение эксплуатационных свойств каната возможно не только за счёт более качественного производства исходных материалов (проволок), улучшения свойств материала, но и корректного их проектирования с последующим контролируемым процессом свивки [1].

В настоящее время метизные предприятия, производящие канаты стремятся охватить не только Российский рынок, но и международный. Для этого выпускаемая продукция переходит на международные стандарты качества, например, DIN. Поэтому целесообразно разработать модель расчета конструкций канатов применительно к различным стандартам (ГОСТ, DIN и др.).

Эффективность использования стальных канатов определяется рядом факторов, наиболее существенными из которых являются: комплекс механических свойств, технология изготовления, максимальное соответствие типа и конструкционных параметров каната условиям его эксплуатации [2, 3].

Рассматривая каждый из приведенных факторов в отдельности, необходимо отметить ведущую роль вопроса конструирования и расчета параметров канатов. Условия работы каната требуют определенного набора механических и эксплуатационных свойств, которые зависят не только от механических свойств исходной проволоки, но и от самой конструкции каната.

Работа по проведению расчетов геометрических параметров каната весьма трудоемка и требует значительных затрат времени. Получаемые расчетные значения величин эксплуатационных характеристик не всегда соответствуют нормируемым значениям. Также довольно часто нет точного соответствия между существующими типами конструкций канатов и целевым условиям его эксплуатации. Все это вызывает необходимость автоматизировать процесс конструирования и расчета параметров каната.

В основу разработки модели расчетов параметров каната заложены известные зависимости [4-7] расчета геометрических параметров свивки. При конструировании также использовали геометрические соотношения между элементами каната и их возможные изменения, связанные с напряженно-деформированным состоянием проволок в процессе волочения и свивки.

Предлагаемый метод включает, как конструирование геометрии формы каната, так и расчет его механических и эксплуатационных характеристик с последующим процессом итерации до достижения заданного уровня свойств. К таким характеристикам относятся: конструктивная плотность – K_n ; критическая длина каната – $L_{кр}$; полное разрывное и агрегатное усилие – $P_{пол}$, $P_{агр}$; удлинение каната – ΔL ; изгибная жесткость – G ; выносливость – Z .

Модель расчета конструкции каната и его механических и эксплуатационных характеристик на примере блок-схемы представлена на **рис. 1**. На примере конструирования каната типа ЛК-О, конструкция 6 x 37 (1+6+12+18), выполняемого по DIN 3066. Используя программу для расчета, можно построить графики изменения механических свойств от диаметра каната (D_k) (**рис. 2, 3**). Диаметр каната (D_k) изменяется от 5 до 30 мм.

Соответствие заданной точности рассчитанных и нормируемых значений является тем критерием, который определяет момент окончания проведения расчетов.

Применение этой модели позволяет рассмотреть влияние конструкции каната на его эксплуатационные свойства. Для этого с помощью программы просчитываются основные механические и эксплуатационные параметры канатов при фиксированных значениях выбранных геометрических параметрах канатов разных конструкций:

- 1) 6 x 37 (1+6+12+18) тип ЛК-О;
- 2) 6 x 36 (1+7+7/7+14) тип ЛК-РО;
- 3) 6 x 19 (1+6+6/6) тип ЛК-Р;
- 4) 6 x 25 (1+6; 6+12) тип ЛК-З;
- 5) 6 x 19 (1+9+9) тип ЛК-О;

Как видно из графика (**рис. 4**), суммарное разрывное усилие канатов различных конструкций до диаметра 10 мм имеет незначительную вариацию, при дальнейшем увеличении диаметра для канатов различных конструкций разница в значении разрывного усилия становится всё больше. Так, при диаметре 30 мм различие самого большого и самого малого значений суммарно разрывного усилия достигает 8 раз. Проводя сравнение между канатами, состоящими из одинакового количества проволок и равного диаметра, но различной конструкции, можно отметить, что разрывное усилие каната конструкции 6 x 19 (1+6+6/6) в 2,3 раза меньше, чем у каната конструкции 6 x 19 (1+9+9), хотя занимает среднее значением между приведенными сравниваемыми конструкциями.

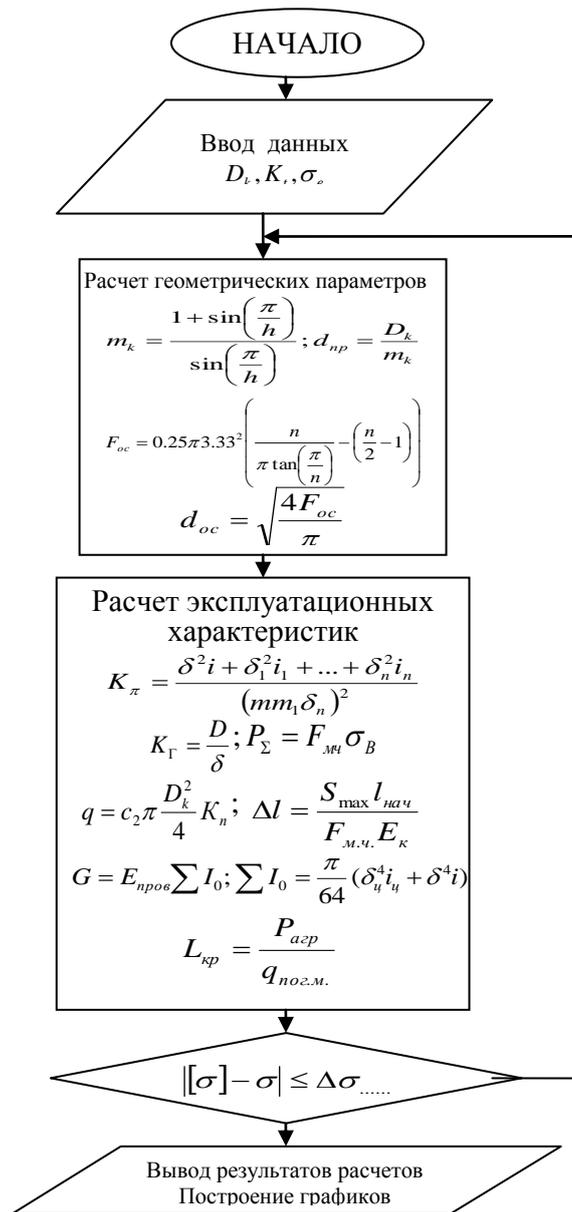


Рис. 1. Блок-схема расчета конструкции каната и его механических и эксплуатационных характеристик



Рис. 2. Изменение веса каната (q) от его диаметра (Dк)

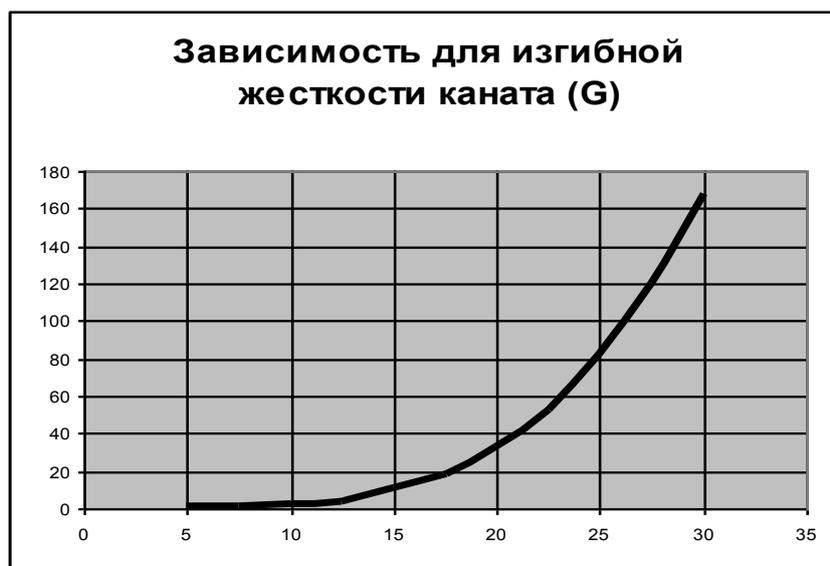


Рис. 3. Изменение изгибной жесткости (G) от его диаметра (Dк)

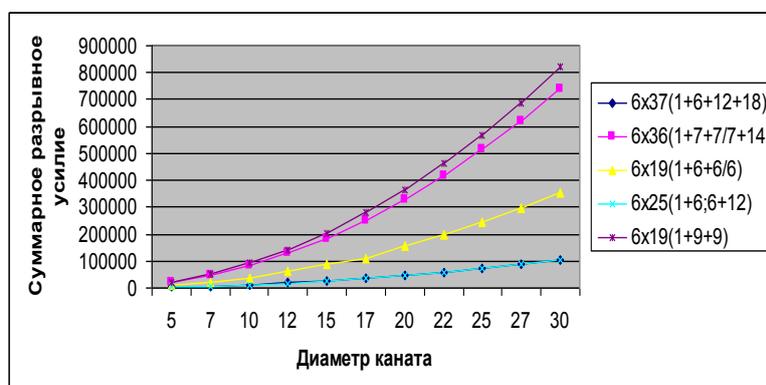


Рис. 4. График зависимостей суммарного разрывного усилия каната от его диаметра (Dк) для различных конструкций каната

Величина разрывного усилия канатов конструкции 6 x 37 x x (1+6+12+18) и 6 x 25 (1+6; 6+12), а также как и конструкций 6x19 x (1+9+9) и 6 x 37 (1+7+7/7+14) практически одинакова.

Применение данной модели конструирования и программы расчета позволяет проводить выбор типа конструкции каната или его диаметр, при заданных значениях эксплуатационных характеристик и учета состояния оборудования и технологии производства, а также проводить сравнительный анализ влияния геометрических параметров свивки на изменение его эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Малиновский В.А. Стальные канаты. Часть 1. Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования. Одесса: Астропринт, 2001. 188 с.
2. Шубин И.Г., Степанова Е.Н., Румянцев М.И. К вопросу практического использования методики оценки результативности системы менеджмента качества метизного производства в технологическом цикле изготовления стальных канатов // Производство проката. 2012. № 3. С. 21-24.
3. Шубин И.Г., Румянцев М.И., Степанова Е.Н. Оценка результативности и стабильности производства грузоподъемных и грузоподъемных канатов // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 46-48.
4. Королев В.Д. Канатное производство. М: Металлургия, 1980. 256 с.
5. Житков Д.Г., Поспехов И.Т. Стальные канаты для подъемно-транспортных машин. М: Metallurgizdat, 1953. 392 с.
6. Боголюбов В.И., Голубев И.М., Амитин И.И. Проволочные канаты. М.: Metallurgizdat, 1950. 358 с.

7. Бородина Е.Н., Шубин И.Г., Румянцев М.И. Прогнозирование показателей качества канатной проволоки и стальных канатов с использованием математических моделей на основе множественного регрессионного анализа // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2014. № 2 (41). С. 63-66.

8. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Повышение эффективности производства стальных подвижных канатов применением калибрующего обжата прядей // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2014. № 2 (41). С. 13-19.

9. Харитонов В.А., Иванцов А.Б. Повышение эффективности действующих рихтующих устройств при производстве стальных канатов // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2014. № 2 (41). С. 24-27.

УДК 621.771

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КАТАНКИ НА ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ

Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н., Железков О.С.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Введение

Исследования проводились в условиях стана 150 ОАО «БМК». Снижение температуры прокатки в чистовом блоке достигается за счет водяного охлаждения раската перед чистовым блоком клетей стана [5,6, 8-14]. Последеформационное двухстадийное охлаждение готовой катанки осуществляется в водяных и воздушных секциях [1-3, 5, 7, 8, 10]. Определение температуры катанки до и после чистового блока, а также на виткоукладчике проводилось оптическим пирометром. Эксперименты проводились для марки стали 08Г2С

При входе металла в секцию его поверхность быстро охлаждается, затем тепловой фронт постепенно перемещается к центру. Это сопровождается значительным перепадом температур по сечению заготовки.

Изменение среднемассовой температуры в секции водяного охлаждения идет с переменной скоростью. Скорость теплосъема максимальна в начале водяной секции, а затем быстро спадает. Примерно половина теплосъема приходится на самое начало водяной секции. При испарении воды, находящейся в контакте с нагретым металлом, образуется паровой слой, препятствующий дальнейшему их соприкосновению; на этом участке проката теплоотвод с поверхности происходит со скоростью, на несколько порядков меньшей, чем при непосредственном соприкосновении его с водой. При ударе струи воды под большим давлением паровой слой пробивается; вода соприкасается с металлом, и температура поверхности очень быстро снижается примерно до температуры кипения воды. На этом участке поверхности обеспечиваются граничные условия, которые характеризуются очень быстрым теплоотводом.

Поэтому увеличение длины секций не оказывает значительного влияния на количество отводимого ими тепла. Использование укороченных секций в многосекционных линиях охлаждения позволяет достичь большей удельной тепловой эффективности водяного охлаждения.

Методика расчета

Наиболее эффективным способом расчета динамики тепловых полей при сложных граничных условиях, характерных для реального технологического процесса, в настоящее время является численное решение тепловой задачи. Производительность современных компьютеров обеспечивает достаточно высокую точность и скорость расчетов.

Математическую модель охлаждения можно построить на основе известного соотношения Остроградского для энтальпии [4, 8, 10]

$$\int_S \bar{Q}_s d\bar{S} = \int_V \left(q - \frac{\partial h}{\partial t} \right) dV, \quad (1)$$

где \bar{Q}_s - тепловой поток через элемент поверхности S ; q - мощность объемного энерговыделения; h - удельная энтальпия; V - элемент объема.

Интегрирование в правой части уравнения ведется по элементу объема, а в левой - по окружающей его поверхности.

Применяя это уравнение к расчету температурных полей в круглой стали, используем следующие допущения:

- теплообменом по длине катанки пренебрегаем,
- тепловые потоки и поля считаем аксиально-симметричными.

С учетом этих допущений тепловая задача становится одномерной нестационарной аксиально-симметричной, и уравнение (1) можно переписать для кольца с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2

$$Q(R_2)R_2 + Q(R_1)R_1 = - \int_{R_1}^{R_2} \frac{\partial T}{\partial t} c \rho r dr, \quad (2)$$

где $Q(R)$ – поток тепла из кольца через поверхность радиуса R ; T – температура; c – теплоемкость; ρ – плотность металла.

На участке водяного охлаждения единственным источником тепловыделения является тепловой эффект полиморфного превращения, однако величина его в сравнении с другими тепловыми потоками невелика, и в первом приближении им можно пренебречь.

Таким образом, из соотношения Остроградского получено интегрально-дифференциальное уравнение, решение которого позволяет рассчитывать динамику изменения температуры.

Для решения уравнения (1) необходимо задать начальное распределение температур по сечению металла и тепловые условия на ее поверхности.

Градиенты температур на входе в секцию водяного охлаждения по сравнению с градиентами, возникающими в ходе охлаждения, незначительны, и начальное распределение температур можно считать постоянным.

На участке ускоренного охлаждения катанка находится в граничных условиях двух видов: во время нахождения внутри секции она охлаждается водой, а во время ее нахождения между секциями – воздухом и радиационным теплообменом.

Для численного решения уравнения (1) необходимо перейти от интегрирования и дифференцирования к конечным разностям. Наиболее целесообразно для одномерного аксиально-симметричного случая разбиение тела сеткой, состоящей из вложенных цилиндрических колец. При этом внешний теплообмен задается только для внешнего слоя, а остальные обмениваются между собой теплом кондуктивно.

Уравнение (1) для i -го слоя можно переписать в виде

$$R_i Q_i + R_{i-1} Q_{i-1} = \int_{R_{i-1}}^{R_i} c \rho \frac{\partial T}{\partial t} r dr,$$

где R_i – радиус соответствующих слоев.

Пусть слой является достаточно тонким, чтобы выполнялось соотношение

$$|T(R_i) - T(R_{i-1})| \ll \frac{T(R_i) + T(R_{i-1})}{2}.$$

В этом случае изменением температуры внутри слоя можно пренебречь, что приведет к постоянству и независимости от координаты теплоемкости и плотности:

Переходя от дифференциалов к конечным разностям, можно записать

$$2(R_i Q_i + R_{i-1} Q_{i-1}) (t' - t) = \rho c (T_i) (T_i' - T_i) (R_i^2 - R_{i-1}^2), \quad (3)$$

где $(t' - t)$ – шаг времени расчета; T_i – температура i -го слоя перед шагом; T_i' – температура i -го слоя после шага.

Результаты расчета, обсуждение

Расчеты проведены для проверки адекватности модели и выявления основных закономерностей тепловых процессов, происходящих на линии ускоренного охлаждения мелкосортного стана.

При исследовании температурной неоднородности необходимо оценивать конечную разность температур по всей длине линии охлаждения.

Конечная разность температур – это разность температур между поверхностью $T_{\text{п}}$ и центром $T_{\text{ц}}$ при входе катанки в виткосборник

$$\Delta T = T_{\text{ц}} - T_{\text{п}}$$

Температуру проката можно снизить приблизительно на одну и ту же величину, применяя различную компоновку линии. Компоновка должна выбираться, исходя из дополнительных требований к охлаждению, в частности, минимизации температурной неоднородности по сечению металла и повышения общей тепловой эффективности водяного охлаждения.

Количество секций на линии охлаждения оказывает существенное влияние на температурную однородность металла. На **рис. 1** приведены результаты расчетов конечной разности температур для следующих вариантов компоновки линии водяного охлаждения:

- три водяных секции на линии – включены все три;
- четыре водяных секции на линии – включены три первые;
- пять водяных секций на линии – включены три первые;
- семь водяных секций на линии – включены четыре первые.



Рис.1. Конечная разность температур по сечению катанки для линии с различным числом секций

Конечная разность температур тем меньше, чем больше число секций на линии охлаждения. Это объясняется тем, что в многосекционной линии охлаждения больше как количество, так и суммарная длина воздушных участков, на которых происходит выравнивание температур.

После прохождения линии охлаждения прокат поступает на виткосборник, после чего подвергается дальнейшему охлаждению на воздухе с помощью вентиляторов. Температурный диапазон воздушного охлаждения соответствует области протекания полиморфных превращений, поэтому температурный профиль проката после прохождения линии воздушного охлаждения в значительной мере определяет потребительские свойства продукции.

Второй возможный способ плавной регулировки теплосъема – изменение давления охлаждающей воды. При изменении давления изменяется температура кипения воды и эффективность «срывания» паровой рубашки. На рис. 2 приведена регулирующая характеристика второго механизма.

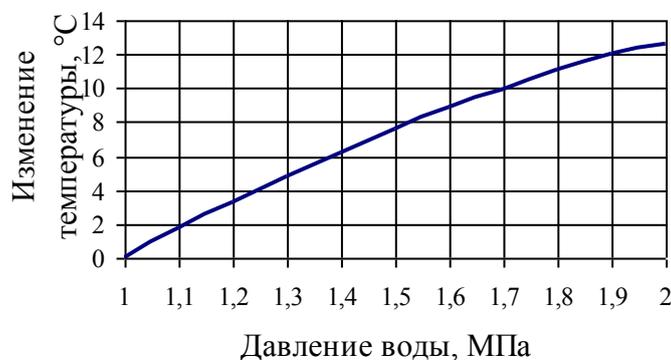


Рис. 2. Изменение температуры на виткосборнике при изменении давления охлаждающей воды

Заключение

Максимальная скорость снижения среднemasсовой температуры катанки и мелкого сорта горячекатаного металла наблюдается на начальном участке секции водяного охлаждения, поэтому эффективность теплосъема (количество теплоты, отводимой с единицы длины действующих водяных секций) увеличивается с увеличением количества секций водяного охлаждения при уменьшении их длины.

Регулирование температуры металла на выходе с участка ускоренного охлаждения можно осуществлять несколькими способами. Наибольшее дискретное изменение температуры достигается при включении – отключении секций. Более точное регулирование достигается при изменении порядка включенных секций. Для плавного регулирования на небольшую величину можно использовать изменение длин секций и давления охлаждающей воды.

Снижения температурной неоднородности по сечению проката можно достичь увеличением количества и длины участков выравнивания температур при сохранении суммарной величины теплосъема. Эта задача решается увеличением количества более коротких секций водяного охлаждения.

Установлено, что для обеспечения эффективного и регулируемого междеформационного охлаждения на стане 150 перед чистовым блоком следует установить минимум две секции водяного охлаждения с длинами не менее одного метра каждая. Для последеформационного охлаждения на стане 150 рекомендуется устанавливать семь секций водяного охлаждения. Такая компоновка линии ускоренного охлаждения позволит минимизировать температурную неоднородность по сечению катанки и обеспечить широкие возможности управления процессом охлаждения.

Список литературы

1. Essadiqi E., Jonas J.J. Effect of deformation on ferrite nucleation and growth in a plain carbon and micro alloyed steels // Metal. Trans. V.20A, (1989). 987-998.
2. Lange W.E., Enomoto M. and Aaronson H.I. The kinetics of ferrite nucleation at austenite grain boundaries in Fe-C alloys. // Metallurgical transactions. V. 19A. (1988). 427-440.
3. Pikkering F.B. Physical Metallurgy and the Design of Steel // Applied Science Pub. London. (1983).
4. Mathematical modeling of plastik deformation process in section rolling / A. Morozov, B. Nikiforov, V. Salganik, A. Pesin, S. Platov, E. Trahtengertz // Pceeding of the 7th international conference on numerical methods in industrial forming process / Simulation of Materials Processing Theory, Methods and Applications. Numiform 2001, Toyohashi, Japan.
5. Урцев В.Н., Рашников В.Ф., Морозов А.А., Капцан А.В., Сафронов М.Ф., Горностырев Ю.Н., Корнилов В.Л. Формирование структуры и механических свойств сталей. Серия «Сталь». Структура и свойства». Под ред. академика Рашникова В.Ф. Магнитогорск. 1998. 158 с.
6. Морозов С.А., Хабибуллин Д.М., Платов С.И. и др. Совершенствование охлаждения проката на мелко-сортно-проволочном стане // Сталь. 2003. № 8. С. 39-41.
7. Фундаментальные научные исследования как элемент стратегии технического развития металлургического предприятия / А.А. Морозов, Р.С. Тахаутдинов, В.Н. Урцев, С.И. Платов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2004. № 3 (7). С. 28-30.
8. Платов С.И. Моделирование процесса охлаждения катанки и мелкого сорта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2005. № 3 (11). С. 51-53.
9. Совершенствование режимов охлаждения катанки из углеродистых сталей на мелко-сортно-проволочных станах / С.И. Платов, В.Н. Урцев, С.А. Морозов, Д.В. Терентьев // Труды пятого конгресса прокатчиков. М.: АО «Черметинформация», 2004. С. 194-195.
10. Математическое моделирование процесса охлаждения металла при мелко-сортной прокатке / В.Н. Урцев, С.И. Платов, С.А. Муриков и др. // Труды шестого конгресса прокатчиков, Липецк, 2005.
11. Прокатка углеродистых сталей в двухфазной области / С.А. Морозов, В.Н. Дегтярев, В.Н. Урцев, С.И. Платов, // Процессы и оборудование металлургического производства: сб. науч. тр. Магнитогорск, 1999. С. 161-166.
12. Прокатка в двухфазной области катанки из сталей 1кп и 08Г2С. Результаты промышленного эксперимента на стане 150 ОАО БМК / В.Н. Дегтярев, В.Н. Урцев, С.А. Морозов, С.И. Платов // Фазовые и структурные превращения в сталях: Труды Всеросс. школы-семинара, вып. 1. Магнитогорск, 2001. С. 255-267.
13. Результаты промышленного эксперимента по двухфазной прокатке на стане 150 ОАО «БМК» / Урцев В.Н., Дегтярев В.Н., Платов С.И. и др. // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: науч.-техн. конф. М.: МИСиС, 2001. С. 102-107.
14. Морозов С.А., Хабибуллин Д.М., Платов С.И. и др. Совершенствование охлаждения проката на мелко-сортно-проволочном стане // Сталь. 2003. № 8. С. 39-41.

УДК 621.778.011

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО СЕЧЕНИЯ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ

**Железков О.С., Мухаметзянов И.Ш.,
Барышников М.П., Малаканов С.А.**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Проволока трапециевидного сечения используется в качестве исходной заготовки для последующего получения пружинных шайб методом навивки. Пружинные шайбы широко используются в различных отраслях промышленности и, в частности, в конструкции верхнего строения железнодорожного пути для крепления рельсов к железобетонным шпалам. Рассматривался процесс волочения проволоки трапециевидного профиля № 10 по ГОСТ 11850-72 с регламентированными параметрами:

- радиусы r скругления углов не должны превышать 1,5 мм;
- временное сопротивление $\sigma_B = 580-780$ МПа;
- относительное удлинение δ - не менее 15 %.

На **рис. 1** представлено поперечное сечение трапециевидного профиля и основные параметры, согласно ГОСТ 11850-72.

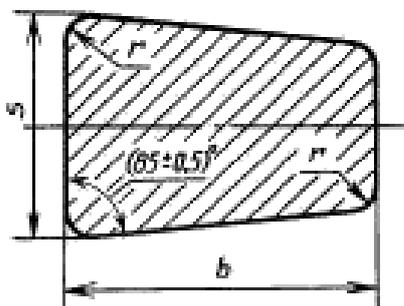


Рис. 1. Поперечное сечение трапециевидного профиля по ГОСТ 11850-72

На качество проволоки по геометрическим параметрам влияют такие факторы, как диаметр исходной заготовки, коэффициент трения между заготовкой и инструментом, схема напряженно-деформированного состояния, чистота поверхности исходной заготовки и др. [1].

В настоящее время существуют две технологические схемы получения проволоки: волочение в четырехроликовой волоке (**рис. 2**), волочение в монолитных волоках (**рис. 3**).

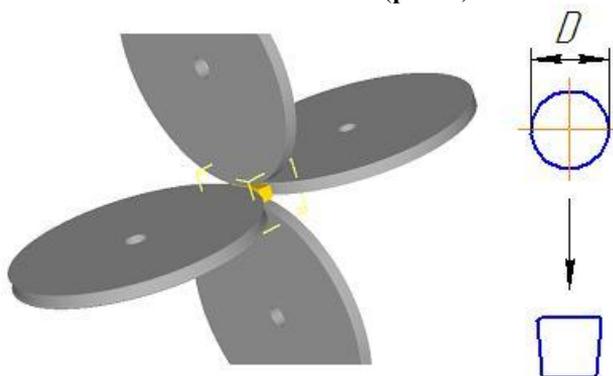


Рис. 2. Технологическая схема волочения проволоки в четырехроликовой волоке

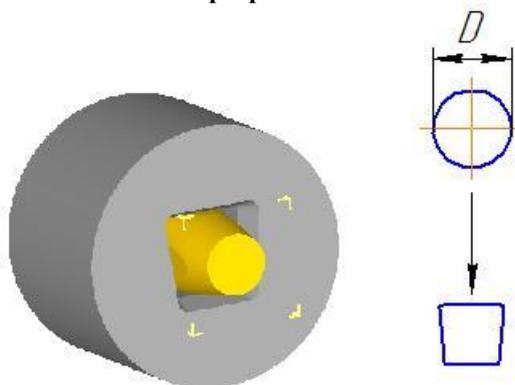


Рис. 3. Технологическая схема волочения проволоки в монолитной волоке

В качестве объекта исследования была выбрана технологическая схема получения проволоки в монолитной волоке. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса волочения проволоки трапециевидного профиля № 10 по ГОСТ 11850-72 из стали марки 40С2А. При этом варьировался диаметр исходной круглой заготовки в диапазоне 11÷13 мм и оценивалось качество проволоки по радиусу r скругления углов.

При компьютерном моделировании процесса волочения проволоки трапецевидного профиля использовали метод конечных элементов [2] на базе программного комплекса «DEFORM-3D». Приняты следующие допущения: материал заготовки изотропный, пластичский; процесс является изотермическим; заготовка не имеет внутренних и внешних дефектов; условие пластичности по Губеру-Мизесу; силы внешнего трения учитываются применением закона трения Амонтона - Кулона; эволюция микроструктуры не учитывается; все объекты, кроме заготовки, несжимаемые (абсолютно жесткие).

На основании смоделированных процессов волочения получена информация об энергосиловых параметрах, напряженно-деформированном состоянии в очаге деформации, в частности, на **рис. 3** показана интенсивность напряжений при волочении

По результатам компьютерного моделирования получена информация об энергосиловых параметрах, напряженно-деформированном состоянии в очаге деформации. На **рис. 4** показаны график изменения усилия волочения и поля распределения интенсивности деформации в сечении при волочении заготовки диаметром 13 мм.

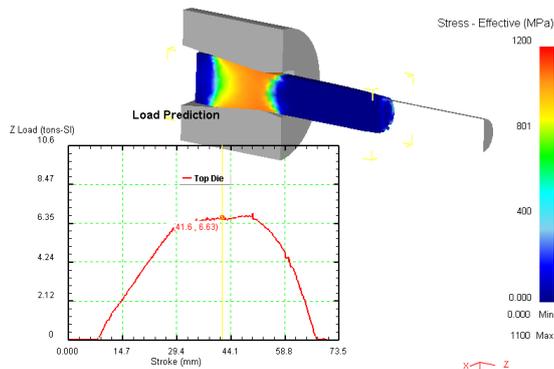


Рис. 4. График усилия волочения исходной заготовки \varnothing 13 мм; поля распределения интенсивности деформаций в пластической зоне

Экспериментальные исследования процесса волочения проводились на кафедре «Машиностроительные и металлургические технологии» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технического университета им. Г.И. Носова» с использованием универсальной испытательной машины модели ЭДЦ-20 («Завод испытательных машин», Лейпциг, Германия). При этом использовалась монолитная твердосплавная волока конструкции фирмы «ТехноВАК» (г. Череповец).

Исходные заготовки (сталь марки 40С2А) круглого поперечного сечения (диаметр 11÷13 мм) с заостренным концом пропусклась через волоку, установленную на верхнюю подвижную траверсу испытательной машины, и жестко зажималась зажимами нижней неподвижной траверсы (**рис. 5**). Подвижной траверсе сообщалось движение вверх и осуществлялся процесс волочения, в ходе которого фиксировалось усилие волочения.

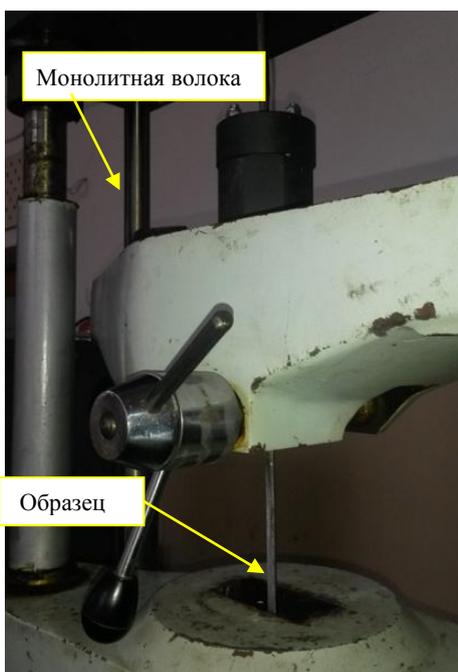


Рис. 5. Размещение волоки и проволоки на испытательной машине ЭДЦ-20

В ходе экспериментов осуществлялось калибрование 5 образцов. По результатам проведения экспериментов получены максимальные значения усилий, затрачиваемых на волочение проволоки в монолитной волоке.

На основании данных, полученных при теоретическом и экспериментальном исследовании, были построены графики распределения максимальных усилий волочения в зависимости от диаметра заготовки (рис. 6).

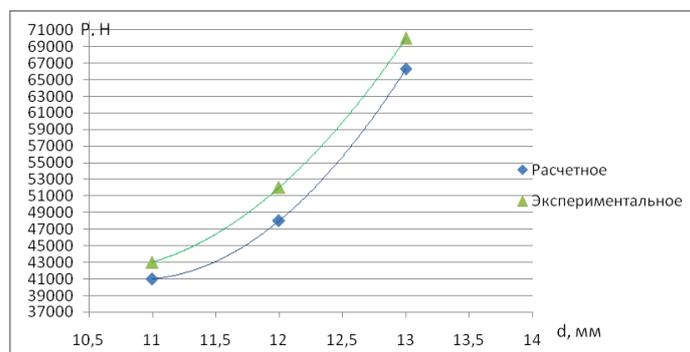


Рис. 6. График усилия волочения при различном диаметре исходной заготовки

Полученные результаты экспериментов использовать для оценки адекватности результатов теоретических исследований.

Анализ результатов компьютерного моделирования и данных, полученных при проведении эксперимента [3-6], показал, что расхождение между усилием волочения, полученным при испытаниях и при моделировании, составило менее 10 %. Это позволяет сделать вывод о достоверности результатов моделирования процесса и возможности использования программного комплекса «DEFORM-3D» для проведения дальнейших исследований, в том числе распространить данный метод на моделирование процесса волочения в роликовых волоках.

Список литературы

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов.: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
3. Железков О.С., Малаканов С.А., Мухаметзянов И.Ш. Исследование процесса волочения в монолитной волоке проволоки трапециевидного сечения / Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. Сб. науч. тр. под ред. В.М.Салганика.- Магнитогорск, Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И.Носова.2011. С.132-134.
4. Моделирование процессов волочения трапециевидной проволоки в монолитной и роликовой волоках / О.С. Железков, С.А. Малаканов, И.Ш. Мухаметзянов и др. // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Междунар. сб. науч. тр. под ред. В.М. Салганика. Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. С. 44-46.
5. Железков О.С., Малаканов С.А., Мухаметзянов И.Ш. Исследование процесса формирования трапециевидного профиля волочением в монолитных и роликовых волоках // Тезисы доклада Международного форума «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении». Челябинск: Изд-во Магнитогорск, гос. техн. ун-та. им. Г.И.Носова. 2011. С. 51-55.
6. Железков О.С., Мухаметзянов И.Ш., Малаканов С.А. Исследование процесса волочения трапециевидного профиля / Материалы 72-ой междунар. науч. техн. конф. «Актуальные проблемы науки, техники и образования». Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. Т. 1. С. 147-148.

УДК 669.771

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ДВУХФАЗНЫХ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Голубчик Э.М., Тарасов П.П.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск, Россия

Интерес к низколегированным двухфазным сталям как к штампуемому материалу повышенной прочностью возник еще в середине 1970-х годов [1]. Однако к концу 1980-х годов интерес к использованию этих сталей

практически сошел на нет, вследствие резкого снижения цен на горючее и недостаточной мотивации производителей автомобилей, так как для внедрения этих сталей требовались существенные коррекции штампов и сварочного оборудования. Ситуация резко изменилась в последние годы прежде всего в связи с введением обязательных, постоянно растущих, требований к безопасности пассажиров [2]. При этом становится наиболее значимым возможность снижения массы деталей автомобиля при одновременном повышении прочностных свойств кузовных элементов. Конструкция кузова, созданная на основе концепции его минимальной массы, порой оказывается ведущей в системе оптимальных параметров автомобиля в целом. Требования к ней вынуждают изготовителей автомобилей проводить обширные конструктивные мероприятия, реализовать которые без увеличения массы можно только с применением стальных листов высокой прочности. Вместе с уменьшением массы автомобиля на 20-25 % сокращается эмиссия углекислого газа. Опыт и исследования показали, что с увеличением прочности стали, растет поглощенная ею энергия, способная к разрушению (если ее не рассеять), т.е. возрастает надежность автомобильных конструкций: двухфазная сталь для своего разрушения требует большего расхода энергии.

Удовлетворить потребность в указанных аспектах стало возможным за счет применения современных высокопрочных сталей. В общем ряду, так называемых «прогрессивных высокопрочных сталей» (AHSS - Advanced High Strength Steels), главенствующая роль принадлежит двухфазным сталям [3]. На сегодняшний день ведущие производители автолистовых сталей имеют в своем портфеле десятки марок двухфазных сталей с прочностью от 500 до 1200 МПа.

В связи с массовой локализацией производственных линий по штамповке деталей кузовов автомобилей зарубежными производителями на территории Российской Федерации, актуальным является вопрос получения необходимых механических свойств проката из высокопрочных сталей, применяемых в автомобилестроении, с целью импортозамещения [4].

Состав марок стали и возможное относительное применение их в кузове автомобиля, вес которого может быть снижен за счет использования до 90 % прочной и особо прочной стали, представлен на **рис. 1**. В составе этих марок стали свыше 70 % - двухфазные стали, составляющие основу стального корпуса современного автомобиля [5, 6].

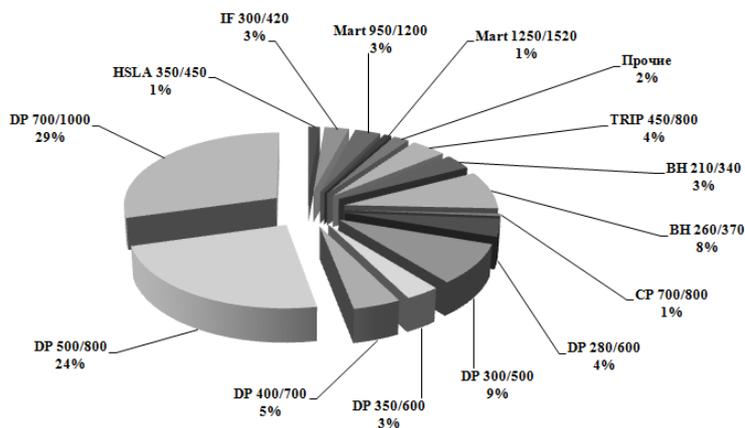


Рис. 1. Соотношение типов и марок стали, прочностные свойства которой благоприятны для ее применения при создании облегченного кузова автомобиля [7]

Представляет значительный интерес исследования механизмов формирования механических свойств металлопроката из двухфазных сталей различных марок в процессе его производства и, в частности, на финишных технологических операциях, таких как термообработка (отжиг) и/или дрессировка. Совокупность технологических параметров заключительных операций в значительной степени оказывает влияние на вариацию и изменение сложного комплекса механических свойств двухфазных сталей.

Кроме того, интерес вызывает вопрос изучения и оценивания влияния химического состава двухфазных сталей и корреляции содержания отдельных элементов с механическими свойствами готовой продукции, что позволяет получать необходимые параметры проката при минимальных затратах на легирующие элементы в рамках определенных режимов дальнейшей переработки данных сталей. Кроме того, подобного рода исследования способствуют разработке стратегии экономного легирования нового поколения высокопрочных двухфазных сталей при массовом их производстве. Для этого необходимо определить корреляцию содержания отдельных элементов химического состава с механическими свойствами высокопрочных двухфазных сталей.

В рамках настоящей работы были проведены исследования холоднокатаного металлопроката из двухфазных сталей марок НСТ780Х и НСТ980Х производства ОАО «ММК» [8-14].

Требования, предъявляемые европейскими нормативными документами к механическим свойствам и химическому составу двухфазных сталей марок НСТ780Х и НСТ980Х, представлены в **табл. 1, 2**.

Таблица 1

**Требования EN 10338:2015 к механическим свойствам
высокопрочных двухфазных сталей марок НСТ780Х, НСТ980Х**

Требования EN 10338:2015 для марки стали	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное удлинение A80, %	ВН эффект МПа
НСТ780Х	440-550	≥ 780	≥ 14	≥ 30
НСТ980Х	590-740	≥ 980	≥ 10	≥ 30

Таблица 2

**Требования EN 10338:2015 к химическому составу
высокопрочных двухфазных сталей**

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	Nb+Ti	V	B
НСТ780Х	$\leq 0,18$	$\leq 0,80$	$\leq 2,50$	$\leq 0,08$	$\leq 0,015$	0,015-2,000	$\leq 1,40$	$\leq 0,15$	$\leq 0,20$	$\leq 0,005$
НСТ980Х	$\leq 0,20$	$\leq 1,00$	$\leq 2,90$	$\leq 0,08$	$\leq 0,015$	0,015-2,000	$\leq 1,40$	$\leq 0,15$	$\leq 0,20$	$\leq 0,005$

В процессе исследования влияния химического состава на механические свойства двухфазных сталей марок НСТ780Х и НСТ980Х были проанализированы результаты 177 испытаний готового металлопроката из 6 плавок. Анализ химического состава стали осуществлялся по ковшевой пробе. Усредненный химический состав исследуемых марок стали представлен в табл. 3.

Таблица 3

**Усредненный химический состав плавок стали
по ковшевой пробе исследованных образцов
марок НСТ780Х и НСТ980Х**

№ плавки	Массовая доля элементов, %											
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Al	Mo	Nb	V	Ti	B
1	0,10	0,08	2,00	0,007	0,008	0,48	0,052	0,112	0,021	0,004	0,002	0,0004
2	0,12	0,29	1,54	0,002	0,017	0,65	0,005	0,052	0,236	0,004	0,003	0,0004
3	0,15	0,17	2,04	0,005	0,011	0,48	0,043	0,209	0,023	0,004	0,002	0,0004
4	0,11	0,09	1,80	0,011	0,009	0,24	0,051	0,069	0,008	0,004	0,002	0,0003
5	0,09	0,04	1,81	0,011	0,010	0,35	0,040	0,083	0,017	0,005	0,002	0,0004
6	0,09	0,04	1,81	0,008	0,010	0,34	0,044	0,094	0,016	0,003	0,002	0,0004

Образцы для испытаний механических свойств металлопроката отбирались от передних и задних концов рулонов холоднокатаных полос после операции дрессировки в условиях ОАО «ММК». Дрессировка осуществлялась с относительными обжатиями 0,3–0,7 %. Усредненные по плавке механические свойства полученных образцов представлены в табл. 4.

Результаты исследований механических свойств образцов проката были обработаны с помощью программного комплекса «Statistic». Полученные вариации механических свойств готового металлопроката из исследуемых двухфазных сталей представлены на рис. 2.

Таблица 4

Усредненные по плавке результаты испытаний механических свойств образцов, полученных в процессе производства стали марок НСТ780Х и НСТ980Х

Марка стали	№ плавки	Усредненные механические свойства		
		Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное удлинение A_{80} , %
НСТ980Х	1	629	974	11,6
	2	504	825	16,8
	3	851	1170	8
НСТ780Х	4	489	740	15,3
	5	502	782	15,2
	6	526	787	15,1

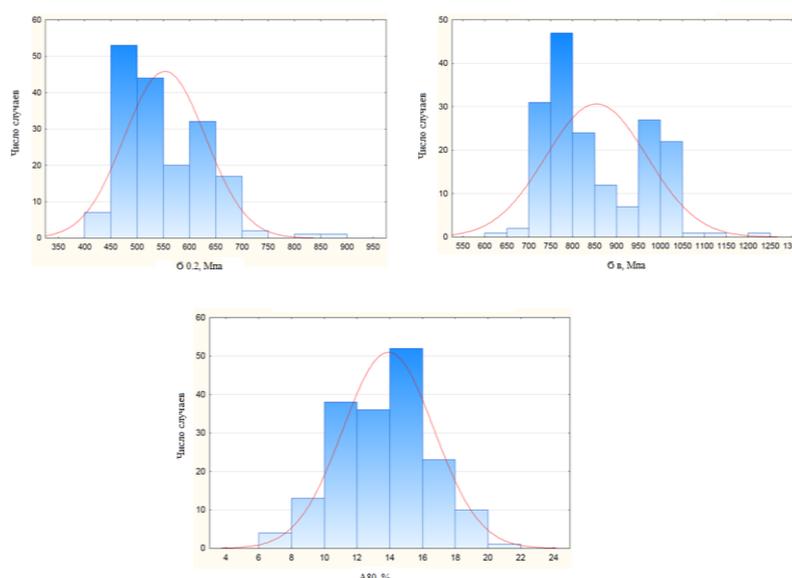


Рис. 2. Усредненные вариации механических свойств готового металлопроката из двухфазной стали марок НСТ780Х, НСТ980Х

На основании результатов исследования методом корреляционного анализа была проанализирована связь между содержанием химических элементов и механическими свойствами готового металлопроката из изучаемых двухфазных микрелегированных сталей.

Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 5, 6, 7.

Значимость коэффициентов Стьюдента проверялась путем сравнения полученных значений с табличной величиной. Исходя из полученной информации, делался вывод о статистической значимости влияния содержания определенных элементов на механические свойства готового проката

Анализ табл. 7 свидетельствует, что с доверительной вероятностью $\alpha = 95\%$ коэффициенты множественной корреляции механических свойств и химического состава являются статистически значимыми, так как расчетное число Фишера F_r больше табличного F . Это свидетельствует, что механические свойства рассмотренных двухфазных сталей частично обусловлены химической композицией сталей.

Коэффициенты множественной детерминации D , приведенные в табл. 7, показывают, что для рассмотренных условий производства металлопроката предел текучести на 91,7 %, временное сопротивление разрыву на 82,7 % и относительное удлинение образцов на 49,4 % обусловлены выбранным в соответствии с нормативными документами химическим составом стали.

Таблица 5

**Значения коэффициентов корреляции механических свойств
и химического состава стали марок НСТ780Х и НСТ980Х**

Химический элемент в стали	Коэффициент корреляции		
	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление разрыву σ_B	Относительное удлинение A_{80}
C	0,313	0,247	-0,177
Si	0,184	0,210	-0,049
Mn	0,775	0,762	-0,661
S	-0,634	-0,677	0,417
P	-0,417	-0,384	0,443
Cr	0,626	0,712	-0,425
Al	0,404	0,346	-0,424
Mo	0,850	0,802	-0,641
Nb	-0,042	0,036	0,141
V	-0,388	-0,338	0,282
Ti	-0,116	-0,045	0,196
B	0,353	0,427	-0,231
Cr+Mo	0,596	0,673	-0,385
Ti+Nb	0,160	0,237	-0,003

Таблица 6

Значения чисел Стьюдента для соответствующих коэффициентов корреляции механических свойств и химического состава стали марок НСТ780Х и НСТ980Х

Элемент	Коэффициент Стьюдента для $\sigma_{0,2}$	Коэффициент Стьюдента для σ_B	Коэффициент Стьюдента для A_{80}	Табличное значение коэффициента Стьюдента
C	4,360	3,360	2,373	1,974
Si	2,482	2,839	0,643	1,974
Mn	16,226	15,525	11,659	1,974
S	10,832	12,121	6,064	1,974
P	6,070	5,481	6,528	1,974
Cr	10,612	13,388	6,216	1,974
Al	5,848	4,858	6,189	1,974
Mo	21,35	17,725	11,062	1,974
Nb	0,561	0,469	1,878	1,974
V	5,563	4,744	3,890	1,974
Ti	1,545	0,589	2,639	1,974
B	4,985	6,225	3,138	1,974
Cr+Mo	9,827	12,018	5,517	1,974
Ti+Nb	2,138	3,218	0,038	1,974

Таблица 7

Показатели множественной корреляции химического состава и механических свойств стали марок НСТ780Х и НСТ980Х

Показатель	$\sigma_{0,2}$	σ_B	A_{80}
<i>R</i>	0,957	0,909	0,703
<i>F_p</i>	126,265	54,692	11,233
<i>a</i>	0,95		
<i>F</i>	1,754		
<i>D</i>	91,652	82,716	49,414

Заключение

Таким образом, результаты исследования позволили сформулировать ряд выводов по влиянию химических элементов, изучаемых двухфазных микролегированных сталей на механические свойства готового металлопроката.

1. С доверительной вероятностью 95 % статистически значимыми являются коэффициенты корреляции между содержанием С, Si, Mn, S, P, Cr, Al, Mo, V, В и пределом текучести и временным сопротивлением разрыву.

Коэффициенты корреляции между содержанием Nb, Ti и прочностными параметрами ($\sigma_{0,2}$, σ_B) с доверительной вероятностью 95 % не являются статистически значимыми.

С доверительной вероятностью 95 % статистически значимыми не являются коэффициенты корреляции между содержанием Si, Nb, Ti+Nb и относительным удлинением образцов.

Отрицательные коэффициенты корреляции говорят о том, что при увеличении содержания химического элемента в стали уменьшается соответствующий показатель механических свойств.

2. При оценке степени влияния массовой доли элементов на механические свойства стали сравнивались полученные в результате корреляционного анализа коэффициенты Стьюдента.

Наибольшее влияние на механические свойства рассмотренных двухфазных сталей, в соответствии с полученными результатами оказывают Mo и Mn. Наименьшее влияние оказывают Si, Nb и Ti.

Проведенные исследования позволяют определить стратегию легирования, в том числе экономного, для управления механическими свойствами металлопроката из двухфазных сталей в процессе его производства.

Работа проведена в соответствии с госзаданием Министерства образования и науки РФ Магнитогорскому государственному техническому университету им Г.И. Носова по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (МОиМ РФ 2014-14 ГЗ 0110 фундаментальные).

Список литературы

1. Yayami S., Ferukawa T. A family of high strength, cold rolled steels // Proc. of an Int. Symposium on High-Strength Low-Alloyed Steels "Microalloying - 75" New York, October 1-3, 1975. PP. 311-333.
2. Peixinho N., Jones N., Ponho A. Application of Dual-Phase and TRIP Steels on the Improvement of Crash-worthy Structure // Material Science Forum, 2005. V. 502. PP. 181-186.
3. Corbett B., Priddle A. Dual Phase leads Revival // Auto Word. 2004. V. 40, No. 9. PP. 31-37.
4. Избыточные мощности в России: угроза кризиса или потенциал роста? / С.Я. Унру, М.В. Немкин, А.Н. Алексеев, Е.Л. Кандауров // Производство проката. 2013. № 11. С. 40-48.
5. Беньковский М.А., Масленников В.А. Автомобильная сталь и тонкий лист. Череповец: Издательский дом «Череповец», 2007. С. 357-365.
6. Кузова следующего поколения. Перспективы технологий обработки поверхности / Б. Осбург, А. Грюнекли, А. Патберг и др. // Черные металлы. 2004. июль-август. С. 55-58.
7. Иводитов В.А. Автомобильная сталь // Производство проката. 2005. № 1. С. 37-44.
8. Освоение технологий производства проката в новом комплексе холодной прокатки / Б.А. Дубровский, П.В. Шилев, С.А. Ласьков, Э.М. Голубчик, А.В. Горбунов, С.А. Лукьянов // Сталь. 2012. № 2. С. 63-65.
9. Разработка инновационной технологии производства высокопрочных инварных сплавов нового поколения / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, А.С. Кузнецова, Е.М. Медведева // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2013. № 1 (39). С. 62 - 66.
10. Разработка композиций многофункциональных сплавов инварного класса с расширенными эксплуатационными характеристиками / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, А.С. Кузнецова, Ю.Л. Родионов, И.А. Кормс, Н.Ю. Бухвалов, А.В. Касаткин, Д.П. Подузов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3 (43). С. 62-66.
11. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014, № 1 (45). С. 63-69.
12. Исследование физико-механических свойств и структуры высокопрочных многофункциональных сплавов инварного класса нового поколения / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик., Г.С. Гун, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, Д.М. Чукин, А.Н. Матушкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 43-48.
13. Голубчик Э.М. Современные концепции адаптивного управления качеством металлопродукции // Качество в обработке материалов. 2015. № 1 (3). С. 68-75.
14. Исследование свойств высокопрочных инварных сплавов нового поколения / Н.В. Копцева, Э.М. Голубчик, Ю.Ю. Ефимова, М.П. Барышников, А.С. Кузнецова, М.Б. Гитман // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2015. № 2 (43). С. 13-18.
15. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения: монография / авторский коллектив: Чукин М.В., Корчунов А.Г., Бакшинов В.А., Барышников М.П., Гун Г.С.,

Долгий Д.К., Ефимова Ю.Ю., Колокольцев В.М., Копцева Н.В., Куранов К.Ю., Лебедев В.Н., Мезин И.Ю., Полякова М.А., Чукин В.В. М.: Металлургиздат, 2014. 276 с.

16. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов // *Металлург.* 2014. № 4. С. 92-96.

17. Научно-педагогическая школа Магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун И.Г., Рубин Г.Ш. // *Качество в обработке материалов.* 2014. № 1. С. 5-9.

18. Гун Г.С., Чукин М.В., Рубин Г.Ш. Управление качеством в метизном производстве // *Металлургические процессы и оборудование.* 2013. № 4. С. 106-112.

19. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства: монография / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2012. 164 с.

20. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Закиров Д.М., Гун И.Г. // *Черные металлы.* 2012. № 7. С. 15-20.

21. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры из высокоуглеродистых марок стали / Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // *Черные металлы.* 2012. № 12. С. 8-15.

33. Высокопрочная арматура для железобетонных шпал нового поколения / Ушаков С.Н., Чукин М.В., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. // *Путь и путевое хозяйство.* 2012. № 11. С. 25-27.

34. Стальная проволока: монография / Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.

35. Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П., Валиев Р.З., Рааб Г.И. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2008. № 1. С. 24-27.

36. Гун Г.С., Чукин М.В. Оптимизация процессов деформирования объектов с покрытиями в технологиях и машинах обработки давлением: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. 323 с.

37. Производство стальной проволоки: монография / Белалов Х.Н., Клековкина Н.А., Клековкин А.А., Никифоров Б.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Зюзин В.И., Кулеша В.А., Савельев Е.В. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 543 с.

38. Metallurgy qualimetry theory design and development / Gun G.S., Rubin G.S.H., Chukin M.V., Mezin I.U., Korchunov A.G. // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University.* 2013. № 5 (45). P. 67-69.

39. Гун Г.С., Пудов Е.А., Иванова Л.Б. Оптимизация процессов обработки давлением по комплексному критерию качества // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* 1982. № 8. С. 62.

40. Инновационные металлургические материалы: монография / под общ. ред. В.М. Колокольцева / Авторский коллектив: Алсараева К.В., Барков Л.А., Барышников М.П., Бреда М., Валиев Р.З., Волокитина И.Е., Голубчик Э.М., Громов В.Е., Гун Г.С. и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 371 с.

УДК 621.778: 658.652

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ширяев О.П.¹, Корчунов А.Г.², Пивоварова К.Г.²

¹ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск

²ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

В условиях постоянного ужесточения требований потребителей к качеству продукции для предприятий метизного производства жизненно важными являются вопросы обеспечения заданного уровня потребительских свойств новых и традиционных видов продукции на основе эффективного сочетания технологических методов обработки и управления показателями качества.

Для успешного решения задач по управлению качеством продукции необходимо иметь математические модели, формально описывающие взаимосвязи между параметрами управления процессом обработки и показателями качества продукции. Процессы метизного производства включают в себя множество технологических операций: травление, волочение, термическую обработку, профилирование, стабилизацию и др. Степень влияния технологии на каждом этапе обработки зависит от технологии на предыдущих технологических шагах. В реальных условиях мы сталкиваемся с нестабильностью (вариативностью) технологии, проявляющейся в том, что при обработке одним и тем же технологическим режимом может быть получена продукция с существенно различающимися конечными свойствами. Имеет место неоднозначное определение качества продукции, т.е. показатели качества не задаются одним значением, а имеют интервал, в пределах которого каждый конкретный показатель может варьироваться. Поэтому для управления качеством метизной продукции важнейшим стано-

вится уменьшение отклонения значений показателей качества на отдельных технологических операциях, которые проходит продукция в свой жизненный цикл, тем самым повышая ее конечные свойства.

Для эффективного решения задач по управлению показателями качества необходимо иметь математические модели, формально описывающие взаимосвязи между параметрами управления процессом обработки и показателями качества изделий, на основе которых возможно определять результативные режимы производства.

Математические модели, описывающие процессы формирования показателей качества изделий в технологиях метизного производства, можно разделить на однозначно определенные (детерминированные) и находящиеся в условиях неопределенности. При исследовании технологических процессов всегда присутствуют неточные исходные данные, неопределенность которых порождается различными факторами. Для корректного анализа сложных технических систем требуются математические модели, учитывающие неопределенность исходных данных. Одним из эффективных средств учета неопределенности являются методы интервального анализа, которые требуют минимального количества информации об исследуемой системе [1-6].

В интервальной модели неопределенность параметра x описывается границами его возможных значений в виде [7]

$$[x] = \{x \mid x^- \leq x \leq x^+\}. \quad (1)$$

Предполагается, что неизвестное истинное значение переменной достоверно лежит внутри интервала $[x]$ и все значения внутри интервала считаются «равновозможными», т.е. на интервале не определяется никакой вероятностной меры. Понятие «равной возможности» не следует трактовать как равномерное распределение случайной величины на интервале, т.к. операции с равномерно распределенными величинами приводят к изменению распределения результата (сумма равномерных распределений стремится к нормальному распределению). Результатом же операций с интервалами всегда является интервал.

Основы интервального анализа были изначально заложены теорией измерений в метрологии, где интервал неопределенности вводится естественным образом. Предполагается, что имеется измеренное неточным прибором величины значение x неизвестной измеряемой величины x_0 , и известна абсолютная ошибка измерения Δ или относительная ошибка измерения δ . Тогда границы интервала неопределенности измеряемой величины x_0 определяются из условия

$$[x_0] = [x^-; x^+] = [x - \Delta; x + \Delta] = [x \cdot (1 - \delta); x \cdot (1 + \delta)]. \quad (2)$$

Теоретической базой интервальных вычислений является интервальная арифметика. В интервальной арифметике операции с положительными (не включающими нуля) интервалами определяются следующим образом

$$[a] + [b] = [a^- + b^-; a^+ + b^+];$$

$$[a] - [b] = [a^- - b^+; a^+ - b^-];$$

$$[a][b] = [a^- b^-; a^+ b^+];$$

$$[a]/[b] = [a^- / b^+; a^+ / b^-]. \quad (3)$$

В метизном производстве, наряду с объективными законами, широко используются эмпирические модели, которые включают экспериментальные, неточно задаваемые переменные. Эмпирические модели являются типичным примером интервальных функций $[y] = f([x_1], [x_2], \dots, [x_k])$. Для одного и того же явления часто существует несколько альтернативных эмпирических формул, отличающихся как структурой, так и числом переменных. При этом включение переменной в модель, с одной стороны, увеличивает ее полноту, т.е. снижает неопределенность, а с другой, - увеличивает общую ошибку модели, связанную с неточностью измерения переменных. Это дает основания говорить об оптимальной структуре модели, при которой достигается наименьшая степень общей неопределенности.

Применение вероятностной модели для решения такой задачи сопряжено со значительными трудностями, так как в этом случае необходимо найти распределение случайной величины y при заданном совместном распределении в общем случае зависимых случайных величин $x_i, i = 1, \dots, k$. Результирующее распределение находится как свертка интегралов. Сравнительно просто находится распределение суммы независимых случайных величин. Однако, уже для отношения даже двух переменных – это нетривиальная операция, при нормальном распределении приводящая к разрыву в нулевой точке знаменателя.

В рамках интервального анализа исследуемая функция неточных переменных записывается в виде интервальной функции $[y] = f([x])$ интервального векторного аргумента $[x] = ([x_1], [x_2], \dots, [x_k])$, конечные границы которой определяются как решение двух задач на экстремум [8]

$$y^- = \min_{x \in [X]} f(x), \quad y^+ = \max_{x \in [X]} f(x). \quad (4)$$

Таким образом, для определения границ необходимо найти наибольшее и наименьшее значение обычной функции векторного аргумента $y = f(x)$, представленной в символьном виде, когда ее аргументы меняются в заданных интервалах $[X]$.

Рассмотрим проблему выбора оптимальной структуры модели на примере эмпирических позиномов. Простейший позином определяется как произведение степенных функций:

$$y = x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \dots \cdot x_k^{\beta_k}, \quad (5)$$

где переменные x_i и показатели степени β_i могут принимать любые неотрицательные значения. Предположим, что показатели степени определены точно, а значения переменных при фиксированных условиях заданы в интервальной форме $[x_i]$. Тогда, учитывая структуру позинома, легко получить, что границы интервала неопределенности $[y] = [y^-; y^+]$ определяются как

$$[y] = [y^-; y^+] = \left[y^- = (x_1^-)^{\beta_1} \cdot (x_2^-)^{\beta_2} \dots \cdot (x_k^-)^{\beta_k}; y^+ = (x_1^+)^{\beta_1} \cdot (x_2^+)^{\beta_2} \dots \cdot (x_k^+)^{\beta_k} \right]. \quad (6)$$

Если заданы точечные измеренные значения x_i и их относительные ошибки измерений δ_{x_i} , то границы результата y целесообразно определить через точечное значение выходной переменной $y = x_1^{\beta_1} \cdot x_2^{\beta_2} \dots \cdot x_k^{\beta_k}$ и ее относительную ошибку δ_y . В общем случае значение δ_y выражается через относительные ошибки переменных следующим образом: $(1 \pm \delta_y) = (1 \pm \delta_{x_1})^{\beta_1} \cdot (1 \pm \delta_{x_2})^{\beta_2} \dots \cdot (1 \pm \delta_{x_k})^{\beta_k}$. При небольших (меньше 0,3-0,5) значениях δ_{x_i} справедлива более простая приближенная формула $\delta_y \cong \sum_{i=1}^k \beta_i \delta_{x_i}$, которая позволяет записать границы интервала неопределенности в виде:

$$y^- = y \cdot (1 - \delta_y); \quad y^+ = y \cdot (1 + \delta_y). \quad (7)$$

В этих условиях включение переменной в модель с одной стороны увеличивает ее полноту, т.е. снижает неопределенность результатов, а с другой увеличивает ошибку модели, связанную с неточностью измерения переменных. Допустим, что модель (5) содержит полный перечень переменных. Тогда, если в модель включено $m < k$ переменных, возникает ошибка из-за ее упрощения и общую ошибку результата можно записать в виде суммы

$$\delta_y(m) = \delta_{y_1}(m) + \delta_{y_2} = \delta_{y_1}(m) + \sum_{i=1}^m \beta_i \delta_{x_i}, \quad (8)$$

где первое слагаемое связано с неполнотой модели, а второе – с ошибками измерения переменных. Для величины $\delta_{y_1}(m)$ выполняются естественные условия $\delta_{y_1}(m) = 0$ при $m = k$ и $\delta_{y_1}(m) = 1$, т.е. имеет место максимальная неопределенность при $m = 0$.

Допустим, что вклад каждой переменной в модели одинаков. Тогда при одинаковых ошибках измерения переменных $\delta_{x_i} = \delta_x$ и степенях β_i формула (8) приобретает простой вид

$$\delta_y(m) = (1 - m/k) + m \cdot \delta_x. \quad (9)$$

При этом зависимость общей ошибки результата за счет неполноты и неточности измерений от числа переменных имеет минимум, равный $\delta_{\min y} = 1 - (1 - k \cdot \delta_x) / (1 + k \cdot \delta_x)$ в точке $m_{opt} = k / (1 + k \cdot \delta_x)$.

Число переменных m_{opt} можно считать оптимальным для эмпирической модели, так как дальнейшее увеличение числа переменных будет приводить к увеличению общей ошибки модели. При $k = 10$ и $\delta_x = 0,05$ оптимальное число переменных для рассматриваемой модели не превышает 6-7.

При моделировании процессов метизного производства обычно применяются линейные регрессионные модели вида:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \beta_k x_k. \quad (10)$$

С целью приведения данной модели к виду (5) прологотенцируем обе части равенства (10)

$$e^y = e^{\beta_0} e^{\beta_1 x_1} e^{\beta_2 x_2} \dots e^{\beta_k x_k}. \quad (11)$$

Введем обозначения экспонент переменных y, x_1, x_2, \dots, x_k

$$Y = e^{y-\beta_0}, X_i = e^{x_i}; i = 1, \dots, k. \quad (12)$$

Выражение (11) примет вид поэнома:

$$Y(X_1, X_2, \dots, X_k) = X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_k^{\beta_k}. \quad (13)$$

Ошибку результата моделирования можно определить из выражения:

$$\delta_Y(m) = \delta_{Y_1}(m) + \delta_{Y_2} = \delta_{Y_1}(m) + \sum_{i=1}^m \beta_i \delta_{X_i} = \delta_{Y_1}(m) + \sum_{i=1}^m \beta_i \delta_{e^{x_i}}, \quad (14)$$

где $\delta_{Y_1}(m)$ – ошибка результата за счет неполноты модели; $\delta_{e^{x_i}}$ – ошибка измерения переменных, представленных в экспоненциальном виде.

Таким образом, ошибка результата моделирования $\delta_Y(m)$ является мерой неопределенности эмпирической модели, связанной с неполнотой модели и неточностью измерений. Ее можно использовать в качестве оценки вариативности (неопределенности) при разработке технологии метизного производства. Ошибка результата моделирования характеризует неопределенность характеристик параметров управления и качества. Чем меньше данный показатель, тем технологический процесс результативнее в качестве получения готовой продукции с заданным набором потребительских свойств.

Уменьшение ошибки результата моделирования $\delta_Y(m)$ свидетельствует об уменьшении неопределенности применяемой математической модели и повышении точности измерительных систем, используемых для оценки качественных параметров и технологического процесса. Это благоприятно влияет на конечные свойства готовой продукции. Рост ошибки результата моделирования, наоборот свидетельствует об увеличении неопределенности и снижении точности значений показателей качества. Уменьшая данный показатель путем выбора оптимального количества показателей качества исходной заготовки и технологических параметров, имеющих наименьшую ошибку измерения, можно получить результативную математическую модель технологического процесса.

Выводы

1. Показано, что учет неопределенности исходных данных при моделировании технологических процессов метизного производства может быть выполнен на основе методов интервального анализа.
2. На основе интервального моделирования подтверждена необходимость учета неопределенности исходной информации при построении математической модели технологического процесса.
3. Предложен показатель неопределенности эмпирической модели, связанный с неполнотой и неточностью измерений – ошибка результата моделирования $\delta_Y(m)$. Применение данного показателя позволяет сделать технологический процесс результативнее в качестве получения готовой продукции с заданным набором потребительских свойств.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор № 02.G25.31.0178 от 01.12.2015 г.).

Список литературы

1. Корчунов А.Г. Управление качеством продукции металлургии в условиях нечеткости технологической информации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С.45-48.
2. Корчунов А.Г. Математические модели управления показателями качества продукции в технологических процессах обработки (научный обзор) // Качество в обработке материалов. 2015. № 1. С. 62-67.
3. Корчунов А.Г., Лысенин А.В. Оценка вариативности технологии метизного производства на основе энтропии // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. № 70. С. 258-260.
4. Корчунов А.Г., Лысенин А.В. Разработка методики оценки результативности технологических процессов производства металлических изделий // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2012. № 38. С. 112-118.
5. Корчунов А.Г., Лысенин А.В. Управление качеством металлургической продукции на основе моделей с элементами нечеткой логики // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2011): Труды IX Международной конференции (14-16 ноября 2011 г., Москва). М: ИПУ РАН, 2011.
6. Корчунов А.Г. Управление качеством метизной продукции на основе нечетких моделей описания технологической наследственности // Металлург. 2009. № 5. С. 50-53. С. 212-218.
7. Вошинин А.П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы // Заводская лаборатория. 2002. № 1. С. 118-126.
8. Вошинин А.П. Задачи анализа с неопределенными данными – интервальность и/или случайность? // МКВМ-2004. Рабочие совещания. С. 147-158.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЬНО-КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ* ПО СХЕМЕ «КВАДРАТ-КРУГ»

Харитонов В.А., Галлямов Д.Э.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», г. Магнитогорск, Россия

В процессе волочения стальной проволоки происходит интенсивный рост прочности с существенным снижением пластичности. Повышение ресурса пластичности позволило бы осуществлять волочение проволоки с большей суммарной деформацией и снизить затраты при ее переработке.

В настоящее время единственным способом изготовления проволоки является волочение в монолитных волоках. Этот способ позволяет получать проволоку различного назначения в широком диапазоне размеров и свойств. Основными преимуществами способа являются высокое качество поверхности, точность размеров готовой проволоки, теоретическая изученность, простота и отлаженность технологического процесса, наличие разнообразного серийно выпускаемого оборудования. Наряду с достоинствами у традиционного волочения имеются и существенные недостатки: неблагоприятная схема напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, определяемая растягивающими напряжениями, высокое контактное трение на границе металла и волоки, вызывающее деформационное старение металла, дополнительный сдвиг поверхностных слоев относительно центральных, являющийся причиной их повышенного упрочнения. К другим недостаткам можно отнести монотонность процесса деформации, неравномерность деформации из-за неполной проработки сечения, значительная зависимость от масштабного фактора. Результатом влияния этих факторов является снижение деформируемости металла и снижение его ресурса пластичности. Поэтому совершенствование процесса волочения в основном заключается в разработке и применении более качественных волочильных смазок, улучшении конструкций волочильного инструмента, повышении эффективности охлаждения проволоки и волок.

Из альтернативных методов распространение получило только волочение через неприводные роликовые волоки, которое достаточно широко используется для производства низкоуглеродистой проволоки и, особенно, холоднодеформированной арматурной низкоуглеродистой проволоки. Более благоприятная схема НДС, определяемая преимущественно напряжениями сжатия, использование активных сил трения (исключается их вредное влияние) положительно сказывается на деформируемости и пластичности проволоки. В отличие от традиционной прокатки, где имеются области внеконтактной деформации с преобладанием растягивающих напряжений, в закрытых калибрах роликовых волок происходит максимальный охват заготовки и за счет всестороннего обжатия растягивающие напряжения подавляются [1].

Что касается других способов производства проволоки – безфильтрного волочения или волочения с наложением ультразвуковых колебаний, то они широкого применения в промышленности не получили.

В настоящее время распространение получило еще одно направление изготовления проволоки – создание комбинированных процессов, объединяющих способы обработки металлов давлением с различной схемой напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. Смена направления течения металла, появление новых систем скольжения способствуют повышению пластических характеристик проволоки. В результате получается новый интегральный процесс, обладающий в силу синергетического эффекта новым комплексом свойств. При комбинированном нагружении за счет изменения схем деформации появляется возможность управления напряженно-деформированным состоянием заготовки и получения свойств проволоки, которые недоступны при традиционном способе. Важным преимуществом комбинированных процессов является возможность формирования ультрамелкозернистой микроструктуры с повышением механических свойств проволоки [2, 3].

На основе имеющейся технической информации и выполненного анализа [4, 5] авторами статьи предложен новый способ комбинированного волочения [6, 7, 8, 9]. В основе способа лежит идея разделить деформацию за проход, при одновременном ее увеличении по сравнению с используемой при традиционном волочении, на две составляющие, одна из которых будет определяться сжимающими напряжениями, а другая растягивающими, т.е. объединить волочение в роликовых и монолитных волоках. Известно, что как при волочении в монолитных волоках, так и при волочении в роликах невозможно управлять напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации. Но это можно сделать при их комбинировании. Причем процесс комбинированного волочения строится на базе традиционного многократного волочения и для его реализации используется имеющееся волочильное оборудование.

Принципиальная схема комбинированного способа волочения приведена на **рисунке**. Согласно схемы заготовка круглого сечения (катанка, передельная проволока) поступает в неприводную роликовую волоку, где формируется промежуточный профиль, далее который протягивается через монолитную волоку и проволока получает круглое сечение. Процесс волочения через обе волоки осуществляется традиционно с помощью волочильного барабана. Таким образом, предложенный способ представляет собой последовательную дефор-

мацию волочением в роликовой и монолитной волоках, осуществляемую за счет приложенного к переднему концу проволоки вытягивающего усилия. Обжатие за проход распределено между неприводной роликовой волокой, где преобладает схема напряженного состояния всестороннего сжатия, и монолитной волокой с двухсторонним сжатием и одноосным растяжением, причем основным процессом является стандартное волочение. Форма промежуточного профиля, получаемого в роликовой волоке, может быть любой (круг, правильный многоугольник). Должно выполняться главное условие - разделение общей деформации за проход на две части, имеющие разные схемы напряженного состояния.

При этом процесс изготовления проволоки, как и в случае традиционного волочения, остается многократным. Требуется только установка на каждом блоке волочильной машины специализированных волочильных модулей и значительного переоборудования не требуется. Подготовка поверхности заготовки осуществляется химическим способом или механическим в линии волочильной машины.

Были проведены промышленные эксперименты и выполнено теоретическое обоснование комбинированного процесса. В качестве промежуточного профиля был выбран невыполненный квадрат. Это связано с простотой его получения в имеющихся 4-х роликовых неприводных клетях типа TURKS HEAD. Кроме того выбор формы промежуточного профиля основывался на рекомендациях по прокатке проволоки в многовалковых калибрах [10] и собственных исследованиях [11]

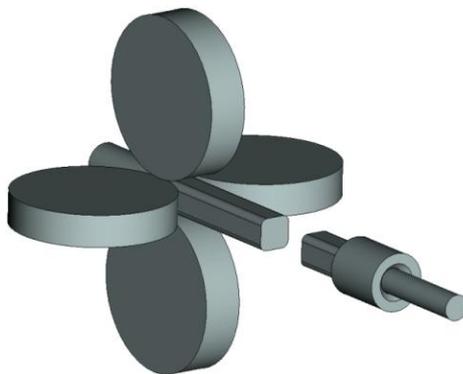


Схема совмещенно-комбинированного способа волочения

Проведенные эксперименты подтверждают, что предложенный способ позволяет получать стальную проволоку более высокого качества, чем при традиционном волочении, и в первую очередь проволоку больших диаметров [8]. Образцы проволоки диаметром 3,20 мм и 4,00 мм из стали марки 70 и диаметром 5,00 мм из стали марки 75 были изготовлены двумя способами: стандартным волочением в монолитных волоках и совмещенным способом в роликовой и монолитной волоках. В экспериментах в качестве промежуточного профиля, получаемого в неприводной роликовой клетке, был использован невыполненный квадрат. Затем был проведен сравнительный анализ механических свойств изготовленных образцов проволоки. У проволоки диаметром 3,20 мм, изготовленной как стандартным, так и комбинированным волочением, прочностные и пластические свойства практически одинаковы. Наоборот, у проволоки диаметром 4,0 мм изготовленной комбинированным способом наблюдается рост числа перегибов в среднем на 15,9 %, а числа скручиваний – на 14,6 %. Это свидетельствует о ее лучшей проработке по сечению и большей равномерности механических свойств по длине. Проволока диаметром 5,0 мм, полученная совмещенным способом, при равных значениях удлинения, сужения и предела прочности выдержала большее число скручиваний на 8,9 %. Результаты эксперимента подтверждают целесообразность применения комбинированного волочения при изготовлении проволоки диаметром более 4,0 мм.

По результатам компьютерного моделирования методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D было установлено, что комбинированный способ позволяет обеспечить хорошую проработку сечения проволоки т.к. в монолитной волоке преимущественно прорабатываются поверхностные слои проволоки, а в роликовой волоке – внутренние слои. Факт лучшей проработки проволоки по сечению при комбинированном нагружении подтверждают и другие исследования [1, 12].

Моделированием волочения квадратной полосы через монолитную волоку установлено, что для невыполненного квадрата НДС в очаге деформации имеет вид близкий к волочению «круг в круг» и зависит от коэффициента заполнения K_z . Наиболее благоприятные условия в монолитной волоке можно обеспечить при волочении промежуточного квадратного профиля со степенью заполнения калибра $K_z \leq 0,9$. В результате проведенных исследований разработана методика определения частных вытяжек и их распределения в модуле между операциями протяжки в роликах и монолитной волоке, необходимая для построения маршрутов комбинированного волочения. Для этого на основе обработки экспериментальных данных и результатов производственных замеров геометрических параметров квадратной проволоки, изготовленной в неприводной 4-х роликовой

клетки типа TURKS HEAD, получены зависимости коэффициента заполнения калибра K_3 от величины коэффициента вытяжки μ

$$K_3 = -137,28\mu^4 + 643,13\mu^3 - 1129,3\mu^2 + 881,17\mu - 256,935$$

Положительное влияние процесса волочения с комбинированным нагружением на свойства стальной среднеуглеродистой проволоки для холодной высадки отмечено в работе [12], в которой на основании численной модели и экспериментального исследования показано, что волочение через чередующиеся монолитные волокна с круглым и овальным рабочим каналом (процесс non-circular drawing или NCD) позволяет достигнуть большей равномерности распределения пластической деформации по сечению проволоки в сравнении с обычным волочением. При NCD волочении происходит чередование растягивающих и сжимающих напряжений из-за изменения геометрии канала волок. Результаты исследований доказывают, что NCD волочение за счет накопления энергии деформации позволяет ускорить сфероидизацию перлита при конечной операции отжига.

Сравнивая разработанный авторами данной статьи способ комбинированного волочения с процессом NCD, отметим его принципиальные отличия. Во-первых, промежуточный профиль у нас принят в виде невыполненного квадрата, что обеспечивает более равномерную проработку сечения проволоки в монолитной волоке. Во-вторых, выполненные исследования [11] показывают, что волочение овального профиля через круглую монолитную волоку приведет к значительной неравномерности деформации по сечению проволоки. Возникающие при этом напряжения из-за расклинивающего действия овала на волоку могут привести к ее разрушению. Кроме того, при волочении овального профиля через волоку с круглым отверстием на выходе из деформационной зоны наблюдается рост напряжения волочения. Поэтому для снижения напряжения волочения целесообразно получать при прокатке промежуточный профиль с максимально возможным числом сторон. В-третьих, промежуточный профиль – многоугольник легче получить, если использовать роликовые волокна или современные роликовые микрокассеты.

При разработке способа комбинированного волочения авторами решалась задача получения холоднотянутой высокопрочной стальной углеродистой проволоки с повышенным ресурсом пластичности. Как показывают проведенные исследования, эта задача была выполнена. Но результаты, приведенные в работе [12, 13], позволяют сделать вывод, что разработанный способ комбинированного волочения может быть успешно применен для изготовления проволоки для холодной высадки со структурой сфероидизированного перлита, а также может облегчить получение аналогичной структуры на высокоуглеродистой проволоке, например, игольной по ГОСТ 5468-88.

Выводы и рекомендации.

1. Комбинированный способ волочения позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием металла в очаге деформации и обеспечивает повышение механических свойств и эксплуатационных характеристик проволоки.

2. Преимуществом способа является легкая встраиваемость модулей в существующее волочильное оборудование с минимальными затратами на переоборудование, совместимость со скоростями грубого и среднего волочения проволоки, отсутствие необходимости синхронизации скорости волочения в роликовой и монолитной волоках.

3. Обеспечивается более полная проработка сечения проволоки, чем при традиционном волочении.

4. В качестве инструмента для волочения целесообразно применение современных роликовых микрокассет любой конструкции, позволяющих получать профили-многогранники близкие к окружности, что будет способствовать снижению неравномерности деформации и нагрузки на волочильный инструмент. Применение в модуле микрокассет с заданной калибровкой значительно упростит настройку маршрутом волочения

*Работа проведена в рамках реализации госзадания № 11.1525.2014К от 18.07.2014 г.

Список литературы

1. Харитонов В.А., Таранин И.В. Исследование эффективности совмещенно-комбинированных способов деформации при производстве проволоки // Труды XIX междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия-2015» / под ред. Е.В. Протопопова, часть 2. СибГИУ, Новокузнецк, 2015. С. 65-69.

2. Харитонов В.А., Усанов М.Ю.. Состояние и направления развития непрерывных способов наноструктурирования круглой проволоки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 3. С. 69-73.

3. Влияние комбинированных методов деформационной обработки на механические свойства углеродистой проволоки / М. В. Чукин, М.А. Полякова, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалева // Черные металлы. 2014. № 12. С. 35-39.

4. Харитонов В.А. Галлямов Д.Э. Исследование эффективности способов волочения стальной проволоки // Вестник «НТУ ХПИ». 2012. № 46 (952). С. 192-198.

5. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Влияние масштабного фактора на выбор способа волочения проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 3. С. 34-37.
6. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Анализ влияния способа деформации на уровень свойств стальной проволоки // Качество в обработке материалов. 2014. № 1. С. 42-48.
7. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Исследование совмещенного процесса «прокатка-волочение» при изготовлении стальной проволоки // Производство проката. 2014. № 4. С. 18-23.
8. В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. Оценка эффективности изготовления стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 12. С. 15-21.
9. Галлямов. Д.Э., Харитонов В.А. Повышение конкурентоспособности проволоки на основе комбинирования способов ОМД // Материалы 73-ей Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» / под ред. В.М. Колокольцева, том 1. Магнитогорск, 2015. С. 108-111.
10. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. М., Металлургия, 1979. 240 с.
11. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Выбор рациональной формы промежуточного профиля при изготовлении стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» // Производство проката. 2015. № 3. С. 30-33.
12. Ho Seon Joo, Sun Kwang Hwang, Hyun Moo Baek, Yong-Taek Im, Il-Heon Son, Chul Min Bae. The effect of a non-circular drawing sequence on spheroidization of medium carbon steel wires. Journal of Materials Processing Technology. 216 (2015) 348 – 356.
13. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. повышение комплекса механических свойств стальной проволоки на основе разработки совмещено-комбинированного способа волочения // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 1 (44). С. 43-48.

УДК 669.017:620.197

ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВА АЖ 4,5, ЛЕГИРОВАННОГО СВИНЦОМ В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

***Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., *Сафаров А.Г., Якубов У.Ш.**

Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан

**Физико-технический институт им. С.У. Умарова
АН Республики Таджикистан*

Введение

Железо всегда присутствует в алюминии, т.к. является преобладающей примесью технического алюминия. Он попадает в алюминий из сырья, а также при использовании стальной оснастки при плавке и литье [1].

При изучении физико-химических свойств высокопрочных, высокопроводящих сплавов алюминия с железом выявлено, что с ростом содержания железа повышается вязкость расплавов, снижается теплопроводность, увеличивается электросопротивление, значительно повышается предел ползучести, тогда как предел усталости снижается, благодаря присутствию фазы $FeAl_3$ [1].

При легировании алюминия железом электродный потенциал изменяется незначительно, т.к. потенциал фазы $FeAl_3$ равен $-0,4 \pm -0,5$ В, а у алюминия $-0,8$ В, разность потенциалов $0,4$ В между алюминием (матрицей) и фазой $FeAl_3$ снижает коррозионную стойкость сплавов [2]. Влияние фазы $FeAl_3$ достаточно велико, т.к. несколько сотых долей процента железа входят в состав твердого раствора, сегрегируя по границам зерен и субзерен, что может привести к межкристаллитной коррозии (МКК) [3]. Последующие добавки, которые образуют дисперсные частицы $FeAl_3$, меняют характер коррозии от межкристаллитной до питтинговой [2].

Ранее нами было изучено влияние добавок железа (до 3 мас.%) на анодное поведение алюминия в среде 3 %-ного электролита NaCl и установлено, что рост содержания железа в алюминии закономерно сдвигает потенциалы свободной коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область значений. Показано, что минимальная скорость коррозии сплавов приходится на сплав эвтектического состава с 2,18 % Fe [2].

Авторами [4] изучено влияние железа (до 5,0 мас.% Fe) к алюминию на дифференц-эффект, выражающийся в изменении скорости саморастворения при анодной поляризации. Показано, что, чем выше содержание железа в алюминии, тем более положительными устанавливаются потенциалы. Коррозионный процесс определяется скоростью растворения из пассивного состояния.

Авторы [5, 6] изучали стационарные потенциалы сплавов системы Fe-Al в 0,5 М растворе NaCl (pH = 6,9) и показали, что добавки железа к алюминию смещают в положительную область потенциал свободной коррозии, т.е. введение в алюминий железа незначительно изменяет активность компонентов сплава. Максимальный сдвиг потенциала отвечает образованию интерметаллического соединения $FeAl_3$.

Целью настоящей работы является исследование анодного поведения сплава АЖ4,5 (алюминий +4,5 мас.% Fe), легированного свинцом, в среде электролита NaCl, различной концентрации. Сплав АЖ4,5 извлекался непосредственно из одной электролизных ванн алюминиевой компании «ГУП ТАЛКО».

Задача состоит в том, чтобы разработать сплав на основе данного металла, не разбавляя его более чистым металлом из других электролизных ванн, т.е. превратить некондиционный металл в полезный обществу продукт.

Экспериментальная часть

Сплавы со свинцом получали в шахтной лабораторной печи СШОЛ при температуре 850 °С добавлением металлического свинца к сплаву АЖ 4,5. Из полученных сплавов в металлический кокиль отливались цилиндрические образцы диаметром 10 мм и длиной 100 мм для исследования электрохимических свойств, торцевая часть которых служила рабочим электродом. Контроль состава сплавов проводился взвешиванием шихты и полученных сплавов. Исследованию подвергались сплавы, вес которых отличался от веса шихты не более, чем на 1 % отн.

Образцы сплавов зачищали наждачной бумагой, последовательно переходя от крупной к мелкой (№2-00), а затем промывали дистиллированной водой, полировали на влажной фильтрованной бумаге и сушили на воздухе. Режим подготовки рабочей поверхности выбрали на основании серии предварительных экспериментов на чистых металлах, исходя из соображений наилучшей воспроизводимости результатов.

Электрохимические исследования легированного свинцом сплава Al+2,18 % Fe проводили на потенциостате ПИ-50-1.1 потенциодинамическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала $2 \text{ мВ} \cdot \text{с}^{-1}$ по методике, описанной в работах [7-8]. В качестве основного служил хлорсеребряный электрод сравнения, а вспомогательным являлся платиновый.

В ходе электрохимических испытаний образцы поляризовали сначала в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении в исследуемый раствор $E_{\text{св.кор}}$ - потенциал свободной коррозии, или стационарный), до значения потенциала 2 мВ, при котором происходит резкое возрастание плотности тока 2 А/м^2 . Затем образцы поляризовали в обратном направлении до значения потенциала $-0,8 \text{ В}$, в результате чего произошло подщелачивание электродного слоя поверхности образца. Далее испытания проходили в катодной области до значения потенциала $-0,8 \text{ В}$, в результате чего происходило восстановление оксидной пленки. Наконец, образцы повторно поляризовали в положительном направлении, при этом при переходе от катодной области к анодной фиксируется потенциал начала пассивации $E_{\text{пп}}$.

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

$E_{\text{ст}}$ или $E_{\text{св.к}}$ - стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;

$E_{\text{рп}}$ - потенциал репассивации;

$E_{\text{по}}$ и $E'_{\text{по}}$ - потенциал питингообразования (или потенциал пробоя) до и после катодной поляризации соответственно;

$E_{\text{кор}}$ - потенциал коррозии;

$E_{\text{пп}}$ - потенциал начала пассивации;

$E_{\text{пп}}$ - потенциал полной пассивации;

$i_{\text{кор}}$ - ток коррозии.

На основании данных параметров рассчитывали величины:

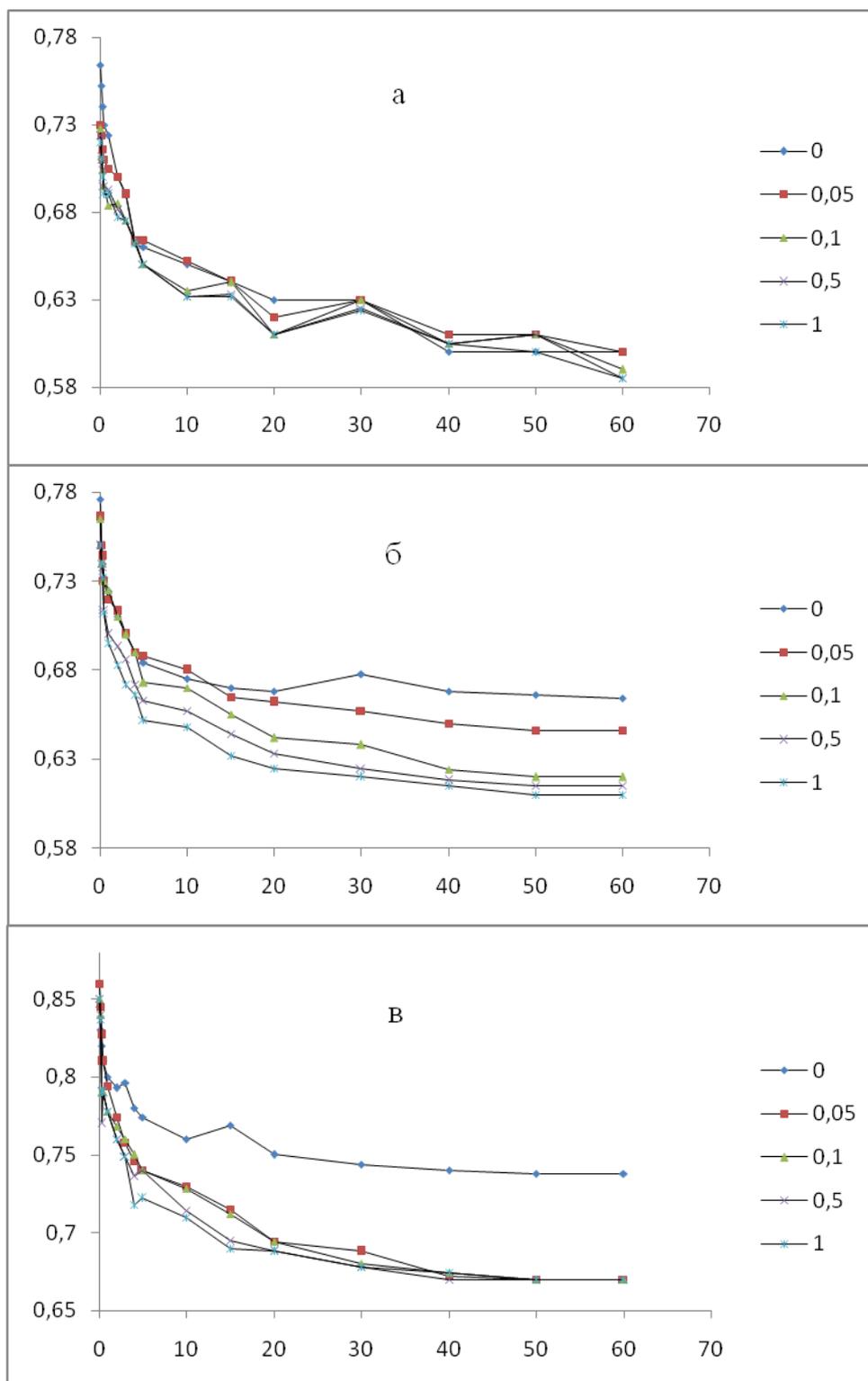
$\Delta E_{\text{пас}}$ - ширина пассивной области $\Delta E_{\text{пас}} = (E_{\text{пп}} - E'_{\text{по}})$;

$\Delta E_{\text{по}}$ - характеристика питтингостойкости $\Delta E_{\text{по}} = (E_{\text{по}} - E'_{\text{св.к}})$.

Расчет тока коррозии как основной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кривой с учетом таффеловской константы, равной 0,12 В. Скорость коррозии K определяли по току коррозии $i_{\text{кор}}$ по формуле $K = i_{\text{кор}} \cdot k$, где $k = 0,335 \text{ г/А ч}$ для алюминия [4]. В качестве примера представлена полная потенциодинамическая кривая для сплава Al+2,18 % Fe с 0,05 % Pb в среде электролита – 3 %-ного раствора NaCl.

Исследования проводили согласно рекомендациям ГОСТ 9.017-74 в среде электролита 3 %-ного NaCl (заменителе морской воды) с целью определения влияния хлорид-ионов на коррозионно-электрохимическое поведение сплава Al+2,18%Fe, легированного свинцом.

Электрохимические исследования полученных сплавов проводились на потенциостате ПИ-50-1.1 с программатором ПР-8 и самозаписью на ЛКД-4. Температуру раствора поддерживали постоянно 20 °С с помощью термостата МЛШ-8. Воспроизводимость результатов на электродах одного и того же состава была в пределах 10 мВ. Измерения проводили в условиях естественной конвекции электролита в воздушной атмосфере. Исследования проводили по методикам, описанным в работах [7, 8]. Результаты измерений для исследованных электродов с различным содержанием свинца приведены на рисунке. Потенциалы приведены относительно хлорсеребряного электрода (х.с.э.).



**Изменение потенциала свободной сплава АЖ 4.5,
 легированного свинцом:
 в среде электролита 0,03 % (а); 0,3 % (б) и 3 %-ного NaCl**

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из рисунка, со временем в течение часа во всех изученных средах потенциал свободной коррозии исходного сплава и легированных свинцом сплавов смещаются в положительную область значений. При этом наиболее отрицательное значение потенциала отмечено у сплавов в среде электролита 3 %-ного NaCl. С ростом содержания свинца в сплаве АЖ 4.5 потенциалы также облагораживаются. Однако, у сплавов со свинцом, как и у исходного сплава с ростом концентрации хлорид-ионов наблюдается уменьшение величины потенциала свободной коррозии. В целом, изменение потенциала свободной коррозии во времени характеризует динамику формирования защитной оксидной плёнки на рабочей поверхности исследуемых образцов.

Коррозионно-электрохимические характеристики сплава АЖ 4.5, легированного свинцом в среде электролита NaCl, приведены в таблице. Как видно, по мере роста содержания свинца в исходном сплаве АЖ 4.5 во всех исследованных средах наблюдается смещение в положительную область потенциалов коррозии ($E_{кор.}$), питтингообразования ($E_{п.о.}$) и репассивации ($E_{р.п.}$).

Коррозионно-электрохимические характеристики сплава Al+4,5 % Fe, легированного свинцом, в среде электролита NaCl

NaCl, мас. %	Содержание свинца, мас. %	Электрохимические потенциалы, (х.с.э.) В				Скорость коррозии	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{р.п.}$	$i_{кор.} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$
						A/m ²	г/м ² .ч
0,03 %	-	0,600	0,910	0,480	0,640	001,2	4,02
	0,05	0,600	0,910	0,465	0,640	001,0	3,35
	0,1	0,590	0,900	0,460	0,600	000,9	3,02
	0,5	0,585	0,795	0,445	0,580	000,8	2,61
	1,0	0,585	0,700	0,440	0,565	000,7	2,35
0,3 %	-	0,664	0,980	0,560	0,720	001,5	5,03
	0,05	1,646	0,920	0,555	0,700	001,2	4,02
	0,1	0,620	0,890	0,540	0,715	001,4	4,69
	0,5	0,615	0,882	0,520	0,710	001,2	4,02
	1,0	0,610	0,875	0,520	0,680	001,2	3,62
3 %	-	0,738	1,020	0,610	0,785	002,4	8,04
	0,05	0,670	0,998	0,610	0,760	001,6	5,36
	0,1	0,646	0,964	0,610	0,750	001,5	5,03
	0,5	0,670	0,956	0,580	0,740	001,4	4,69
	1,0	0,670	0,928	0,560	0,710	001,2	4,02

Наиболее отрицательное значение указанных потенциалов имеет место в среде 3 %-ного NaCl, как наиболее агрессивной среде. Так, если потенциал коррозии сплава АЖ 4,5 с 1 % свинца в среде электролита 0,03 %-ного NaCl составляет -0,700 В, то в среде 3 %-ного NaCl оно равняется -0,928 В. Добавки свинца почти в 2 раза снижают скорость коррозии исходного сплава, что объясняется его положительным влиянием на электрохимические параметры процесса коррозии, т.е. замедляется анодный процесс коррозии у легированных свинцом сплавов. Снижение скорости коррозии у тройных сплавов происходит в результате измельчения структуры эвтектики α -Al + FeAl₃ под воздействием модифицирующего влияния добавок свинца, что, в свою очередь, способствует смещению в положительную область основных электрохимических параметров процесса коррозии.

Заключение

Механизм питтинговой коррозии алюминиевых сплавов состоит в нарушении пассивного состояния при достижении потенциала пробоя (питтинга) и дальнейшей коррозии в отдельных точках, которая автокаталитически поддерживается, вследствие изменения состава раствора в вершине питтинга. В этом отношении все алюминиевые сплавы имеют практически одинаковую чувствительность к питтинговой коррозии, поскольку значения потенциалов пробоя в идентичных средах у них мало различается.

Применительно к нашему случаю следует отметить, что потенциал питтингообразования исходного сплава АЖ 4.5 при легировании его свинцом до 1 % (мас.) значительно облагораживается, что, в свою очередь, вызывает уменьшение скорости коррозии сплавов. По своим электрохимическим параметрам исследованные сплавы вполне могут применяться в качестве протекторных материалов для защиты от коррозии стальных сооружений.

Имея потенциал коррозии $-0,738 \div -0,670$ в среде электролита 3 %-ного NaCl, они обеспечивают разность потенциалов с железом ($-0,35$ В) $0,35-0,40$ В, что вполне достаточно для обеспечения уровня защиты стальных изделий от коррозии в пределах 90–95 %.

Список литературы

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 46 с.
2. Умарова Т.М., Ганиев И.Н. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах. Душанбе: Дониш, 2007. 258 с.
3. Алюминиевые сплавы. Свойства, обработка применение / Под. ред. Дриц М.Е. М.: Металлургия, 1979. 679 с.
4. Красноярский В.В., Саидалиев Н.Р. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах // Защита от коррозии и окружающей среды. М.: 1991, Вып.3. С. 14–19.
5. Медиоланская М.М., Ратинян А.Л., Янковский А.А. Электрохимическое поведение сплавов железо-алюминий (стационарные потенциалы) // ЖПХ. 1987. № 8. С. 1877–1879.
6. Медиоланская М.М., Никитина Л.И., Яновский А.А., Ратинян А.Л. Электрохимическое поведение сплавов железо-алюминий (анодное поведение) // ЖПХ. 1987. № 8. С.1880–1881.
7. Анодное поведение сплава Al + 2.18 % Fe, легированного кальцием, в среде электролита NaCl / Дж. Х. Джайлоев, И.Н. Ганиев, И.Т. Амонов Х.Х. Азимов // Известия ВУЗов. Химия и хим. техн. 2015, Т. 58. № 12. С. 38–42.
8. Раджабаелиев С.С., Ганиев И.Н., Амонов И.Т. Влияние свинца на анодное поведение сплава Al+2,18 % Fe // Вопросы материаловедения. 2016. № 2 (86). С. 147–152.

УДК 66.083

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФОРМОВАНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ГРАФИТА

Самодурова М.Н., Барков Л.А., Латфулина Ю.С.

Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск, Россия

Введение

В последние десятилетия все больший интерес зарубежных и отечественных ученых вызывают исследования процессов высокоскоростного формования металлических [1, 2], полимерных [3], керамических [4, 5], углеродных [6] и других порошковых материалов.

Уже ряд лет в научно-образовательном центре (НОЦ) «Ресурсный центр спецметаллургии» ЮУрГУ выполняются исследования процессов высокоскоростного формования порошковых графитопластовых материалов на устройствах шведской фирмы *Hydropulsor*² и американской фирмы *Instron*³. Рассмотрим конструктивные особенности этих устройств и результаты выполненных на них экспериментальных исследований.

Известные высокоскоростные исследования на устройстве фирмы *Hydropulsor*. Фирма Höganäs одной из первых в конце XX в. выполнила исследования процесса получения металлических порошков по методу *High Velocity Compaction (HVC)*. Это были порошки, предназначенные для высокоскоростной листовой штамповки и калибровки на высокоскоростных устройствах типа *HYP30*, выпускаемых шведской компанией *Hydropulsor* [7]. На пневмогидромеханических устройствах марки *HYP30–15*, имеющих массу падающих частей от 5 до 1200 кг и скорость падения этих частей от 2 до 30 м/с исследователи получали высокоплотные заготовки массой от 5 до 10 кг из порошков разных марок легированных сталей с плотностью после спекания до 7,8 г/см³.

В настоящее время для высокоскоростного формования порошковых материалов фирма *Hydropulsor* выпускает специальные устройства типа *HYP35* марок *HYP35–02*, *HYP35–04*, *HYP35–07*, *HYP35–18* и *HYP35–40*.

На высокоскоростном устройстве фирмы *Hydropulsor* марки *HYP35–04*, установленной на шведской фирме *Sinterheat*, учеными этой фирмы совместно с учеными шведского университета *Dalarna* выполнены исследования по компактированию порошков суперсплава на основе кобальта, распыленных газом и водой. На

² *Hydropulsor AB* // www.hydropulsor.com

³ *Instron Engineering Corp.* // www.instron.ru

порошках, распыленных водой, при формовании с энергией, равной 4 кДж, удалось получить высокую плотность образцов диаметром 25 мм, достигающую 95 % от теоретической плотности [8].

По результатам исследований, проведенных в пекинском университете Науки и Технологии, был опубликован ряд работ, посвященных высокоскоростному компактированию медных [9] и железных [10, 11] порошков. Исследования выполнялись на устройстве марки *НУР35-07* фирмы *Hydropulsor*, имеющей боек массой 135 кг, обеспечивающий за один удар кинетическую энергию в 7 кДж. Исследованиями формования образцов из электролитических порошков меди установлено, что способом *HVC* при энергии, равной 6 кДж, достигается плотность прессовок, равная 95 % от теоретической плотности меди. При использовании распыленного водой железного порошка с добавлением смазки (стеарата цинка) в объеме 0,5 % по массе из насыпки порошка массой 130 г получали кольцевые образцы наружным диаметром 60 мм и внутренним диаметром 30 мм. Компактирование выполнялось за один удар бойка с энергией от 3804 до 6848 Дж и импульсными нагрузками за два или три импульса. При двух импульсах первый имел энергию, равную 1141 Дж, второй имел энергию от 2663 до 5707 Дж, при трех импульсах первый имел энергию, равную 761 Дж, второй, равную 1522 Дж, третий имел энергию от 2282 до 4565 Дж. Исследование плотности показало, что максимальная плотность достигается при двухимпульсном нагружении и минимальная – при трехимпульсном, что свидетельствует о приложении излишней энергии.

Французскими учеными выполнены сравнительные исследования процессов статического и высокоскоростного компактирования керамических порошков (Al_2O_3) [12] на высокоскоростном устройстве марки *НУР35-18* фирмы *Hydropulsor*. Максимальная скорость бойка этой машины равна 11 м/с, а максимальная кинетическая энергия бойка достигала 20 кДж. Частицы порошка оксида алюминия, как известно, отличаются высокой твердостью и хрупкостью. Насыпка порошка в пресс-форме со средним размером частиц менее одного микрона, содержащая до 2,5 % по массе связки типа ПВА, не имеет ни пластических, ни вязких свойств в процессе формования при комнатной температуре. Формование таблеток диаметром 15 мм статическим способом выполнялось также на обычном гидравлическом прессе со скоростью 200 мм/мин. При этом удельное усилие формования изменялось от 10 до 800 МПа. Такие же таблетки формовались высокоскоростным способом на *НУР35-18*. Максимальное удельное усилие прессования было равно 1260 МПа. Исследование плотности прессовок выполнялось после их спекания. В результате установлено, что при удельном усилии прессования до значения 550 МПа оба способа дают практически одинаковое значение плотности прессовок, при больших усилиях способ *HVC* обеспечивает более высокие значения плотности прессовок. Общий вид устройства марки *НУР35-18* показан на **рис. 1**. Следует также отметить публикации американских, французских и китайских ученых по исследованиям процессов высокоскоростного формования порошковых материалов, выполненные в самые последние годы [13–18].

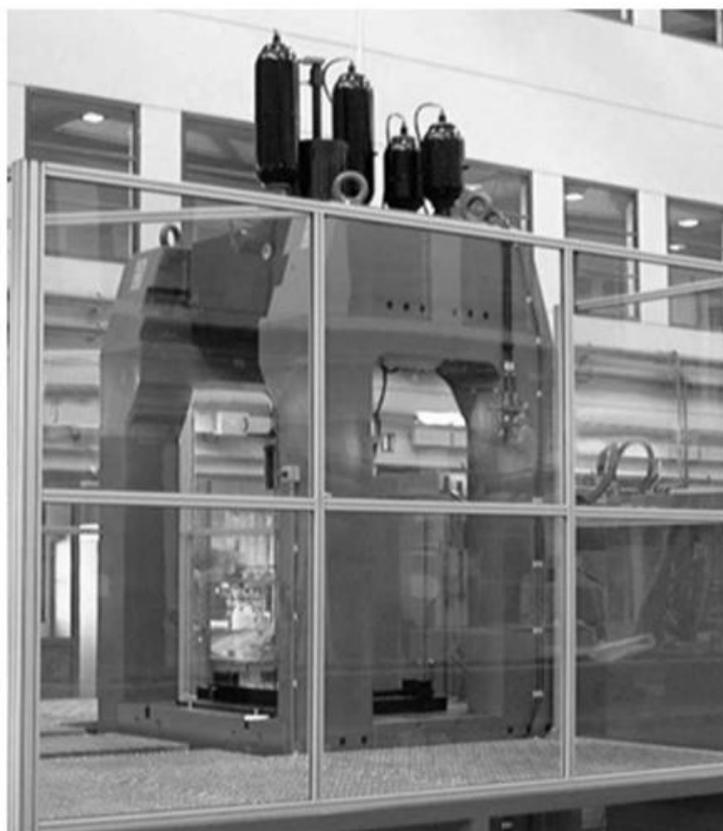


Рис. 1. Общий вид устройства марки *НУР35-18*

Исследования формования углеродных композиций на устройстве фирмы *HYDROPULSOR*. В НОЦ «Ресурсный центр спецметаллургии» ЮУрГУ при сотрудничестве с французскими учеными на этом же устройстве марки *НУР35-18* выполнен большой объем исследования по высокоскоростному формованию углеродных порошковых композиций [19, 20]. Схема действия сил в прессующем устройстве показана на **рис. 2**.

Работает прессующий блок устройства следующим образом. В полость пресс-формы засыпается порошок и устанавливается пуансон. Высокоскоростное прессование начинается в результате воздействия пульсатора (показан стрелкой) на верхний пуансон. Пульсатор в свою очередь получает импульс энергии, равной 18кНм, от разрядки аккумулятора с высоким давлением жидкости. Предусмотрены как изменение импульсов энергии от 10 до 100 % от максимальной энергии, так и скорости перемещения пульсатора от 1 до 11 м/с. При работе в пульсирующем режиме формования минимальное время между импульсами составляет 450 мс.

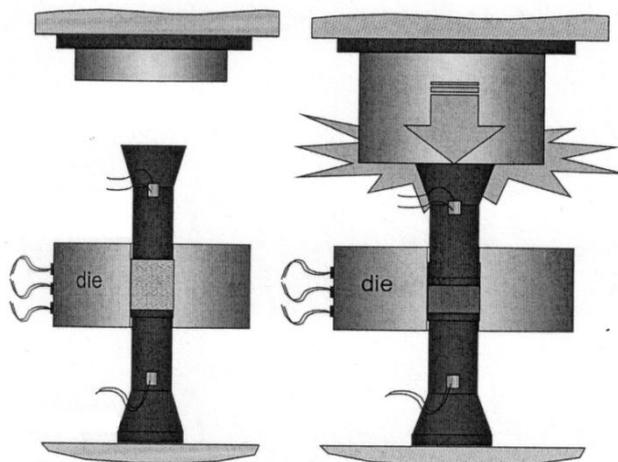


Рис. 2. Схема действия сил в прессующем устройстве *НУР35-18*

Составы порошковых композиций, подвергнутых формованию при высоких энергиях формования и скоростях пуансона, приведены в **табл. 1**. В качестве наполнителя порошковых композиций используется «графит искусственный измельченный» по ТУ 1916-109-071-2009. В качестве связки используется порошковая фенол формальдегидная смола новолачного типа по ТУ 2257-005-05761778-2002, содержащая уротропин, марки СПФ-011А. Электролитический порошок меди марки ПМС-1 имеет насыпную плотность 1,25÷2,00 г/см³. Добавка порошка кокса представляет собой нефтяной кокс марки КНТ. Стеарат цинка используется в качестве смазки.

Таблица 1

Составы порошковых композиций

Номер состава	Графит, %	Связка, %	Медь, %	Кокс, %	Стеарат цинка, %
1	100	-	-	-	-
2	86	14	-	-	-
3	76	14	10	-	-
4	71	14	-	15	-
5	71	14	-	10	5

В результате формования из порошка графита (**табл. 2**) цилиндрических образцов при энергии формования 212÷1892 Дж и скорости пуансона 1,10÷3,29 м/с получили следующие результаты: образцы составов 1и 2 разрушились, образцы 3 и 4 имели дефекты. Из результатов эксперимента⁴, приведенных в **табл. 2**, видно, что увеличение энергии формования и скорости пуансона приводит к повышению плотности прессовок.

При формовании образцов из композиций графит+смола со значениями энергий и скоростей, указанных в **табл. 3**, дефектов обнаружено не было. При повышении энергии формования и скорости перемещения пуансона пресс-формы наблюдается устойчивая закономерность повышения плотности прессовок от 1,60 до 1,76 г/см³.

⁴ В экспериментах принимал участие Яров Б.А.

Таблица 2

Параметры формования образцов из порошка графита

Номер образца	Энергия, Дж	Скорость, м/с	Диаметр образца, мм	Высота, мм	Плотность, г/см ³
1	212	1,10	Образец разрушился		
2	394	1,50	Образец разрушился		
3	1450	2,88	51,2	12,24	1,63
4	1892	3,29	51,1	11,95	1,68

Таблица 3

Параметры формования образцов из композиции графит+смола

Номер образца	Число образцов	Энергия, Дж	Скорость, м/с	Диаметр образца, мм	Высота, мм	Плотность, г/см ³
5	2	394	1,50	50,35	12,93	1,60
6	1	632	1,90	50,34	12,75	1,62
7	1	816	2,16	50,30	12,68	1,63
8	1	1008	2,40	50,26	12,38	1,68
9	1	1230	2,65	50,24	12,26	1,69
10	1	1450	2,88	50,18	12,15	1,72
11	1	1657	3,08	50,16	12,08	1,73
12	1	1892	3,29	50,15	11,99	1,74
13	2	2074	3,44	50,15	11,97	1,75
14	5	2247	3,58	50,14	11,84	1,76

Формование образцов из композиций графит+связка+медь со значениями энергий и скоростей, приведенных в табл. 4, трудностей не вызвало.

Таблица 4

Параметры формования образцов из композиции графит+смола + медь

Номер образца	Число образцов	Энергия, Дж	Скорость, м/с	Диаметр образца, мм	Высота, мм	Плотность, г/см ³
15	1	1450	2,88	50,13	7,97	2,62
16	1	1892	3,29	50,10	7,90	2,64
17	1	2074	3,44	50,08	7,87	2,66
18	3	2247	3,58	50,07	7,83	2,67

Частичная замена графита порошком кокса к положительным результатам не привела. Все девять образцов, полученных при энергиях формования 1892, 2074 и 2247 Дж и скоростях 3,29; 3,44 и 3,58 м/с, имели дефекты в виде микро- и макротрещин. Добавление в композицию смазки (стеарата цинка) не привело к устранению этих дефектов.

Наибольший интерес представляют результаты исследований по формованию образцов из композиции графит+смола, поскольку из этой композиции промышленные предприятия России и других стран производят большой объем графитопластовых изделий, в первую очередь электротехнического назначения. Из рис. 3 видно, что скорость формования изделий по сравнению с существующей технологией можно увеличить с 15÷30 мм/с до 3÷3,5 м/с, т.е. в 10÷20 раз.

Энергия формования при скорости 3÷3,5 м/с и массе бойка в 350 кг равна 1600÷2200 Дж. Попытки дальнейшего увеличения скорости формования приводили вначале к снижению плотности прессовок, а затем к их разрушению.

Таким образом, выполнение исследования показали, что оптимальными параметрами процесса высокоэнергетического формования, позволяющими на графитопластовых композициях достичь максимальной плотности прессовок, являются параметры скорости 3÷3,5 м/с и энергий 1600÷2200 Дж.

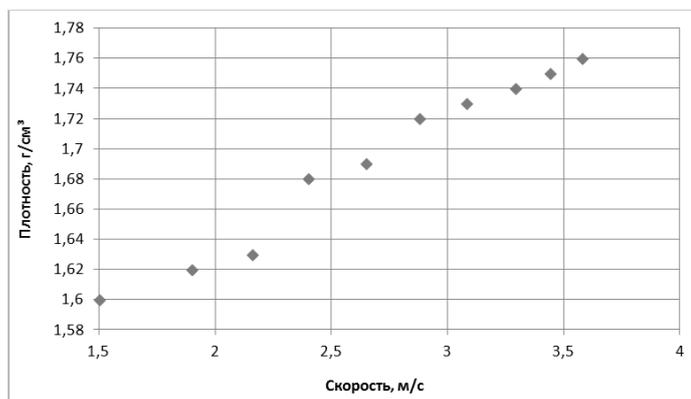


Рис. 3. Зависимость плотности прессовок от скорости пуансона пресс-формы

Исследование формования углеродных композиций на устройстве фирмы *Instron*. Одна из ведущих в мире фирм по производству высокоскоростного испытательного оборудования американская фирма *Instron Engineering Corp.* была создана в 1946 году сотрудниками Массачусетского технологического института Х. Хиндмэном и Дж. Барром.

В ЮУрГУ находится в эксплуатации испытательное высокоскоростное устройство этой фирмы марки *CEAST 9350*. Общий вид устройства для высокоскоростных испытаний показан на **рис. 4**.



Рис. 4. Общий вид устройства марки *CEAST9350*

Instron CEAST 9350 – современный универсальный электромеханический измерительный стенд-копер, предназначенный для выполнения широкого спектра высокоскоростных испытаний на удар как готовых изделий, так и образцов из различных материалов, в том числе и из порошковых. Стенд-копер позволяет проводить испытания в широком диапазоне скоростей ударника (от 0,77 до 24 м/с) и кинетических энергий нагружения изделий или образцов (от 0,59 до 1800 Дж) при массе ударника от 2 до 70 кг. Кроме того, как видно из **рис. 4**, в верхней своей части копер оснащен системами повышения скорости ударника до 24 м/с при массе ударника

2 кг и повышение скорости ударника до 7 м/с при массе ударника 70 кг. В нижней своей части копер оснащен температурной камерой для охлаждения и нагрева образцов в диапазоне температур от –100°С до 150°С.

Для выполнения исследований ударник снабжен сменным наконечником, содержащим тензодатчик, находящийся в контакте с системой регистрации измеряемых параметров. Все параметры, включающие скорость, энергию, высоту ударника, управляемые через программное обеспечение *Visual Impact*, не только собирают информацию, но и обрабатывают её. Результаты исследования могут быть представлены в виде графиков и таблиц.

Исследования выполнялись на пресс-форме⁵, позволяющей получать образцы диаметром 10 мм из порошковой композиции № 2 (см. **табл. 1**). В первой серии исследований масса ударника была равна 5,1 кг, скорость ударника изменялась в пределах от 1,0 до 4,6 м/с, энергия удара при этом изменялась от 2,5 до 54,4 Дж. Во второй серии исследований масса ударника изменялась от 5,1 до 26,6 кг, скорость ударника оставалась постоянной, равной 2,0 м/с при энергии удара в диапазоне от 12,8 до 36,1 Дж. Результаты исследований, приведенные выше в **табл. 5**, являются предварительными. Выполняется исследование по установлению оптимальных значений отношения M_n/M_b . После завершения этих исследований будут сделаны практические выводы.

Таблица 5

Результаты компактирования порошков на основе графита на устройстве Instron CEAST 9350

№	Скорость ударника, V_b , м/с	Масса ударника, M_b , кг	Энергия удара, E_b , Дж	Удельная энергия удара, $E_{уд}$, Дж/г	Диаметр образца d_n , мм	Высота образца h_n , мм	Размерный коэффициент h_n/d_n	Масса прессовки M_n , г	Массовый коэффициент, M_n/M_b , г/кг	Плотность ρ_n , кг/м ³
Первая серия опытов										
1	1	5,1	2,5	-	-	-	-	-	-	-
2	1,2		3,7	2,18	10,2	17,1	1,676	1,70	0,3333	1266
3	1,4		5,0	3,15	10,3	15,2	1,476	1,62	0,3176	1263
4	1,6		6,6	3,87	10,25	15,65	1,527	1,70	0,3333	1316
5	1,8		8,3	5,21	10,3	16,0	1,553	1,62	0,3176	1200
6	2,2		12,5	7,78	10,25	15,45	1,507	1,62	0,3176	1255
7	2,6		17,4	12,42	10,25	13,3	1,298	1,42	0,2784	1276
8	3,0		23,2	15,43	10,3	13,8	1,340	1,50	0,2941	1305
9	3,4		29,7	17,49	10,25	15,0	1,463	1,68	0,3294	1373
10	3,8		37,1	22,65	10,25	14,0	1,366	1,63	0,3196	1420
11	4,2		45,4	28,90	10,3	13,45	1,306	1,58	0,3098	1402
12	4,4		49,8	31,72	10,25	13,0	1,268	1,58	0,3098	1464
13	4,6		54,4	34,45	10,25	12,9	1,259	1,58	0,3098	1485
Вторая серия опытов										
14	2,0	6,1	12,8	7,97	10,3	14,7	1,427	1,6	0,2623	1307
15	2,0	8,6	16,8	10,85	10,3	13,8	1,340	1,55	0,1802	1349
16	2,0	11,6	21,2	12,40	10,25	14,9	1,454	1,71	0,1474	1392
17	2,0	14,6	24,4	15,35	10,3	13,6	1,320	1,59	0,1089	1404
18	2,0	18,6	28,7	18,13	10,2	13,0	1,257	1,58	0,0849	1488
19	2,0	20,6	31,9	19,81	10,25	13,2	1,288	1,61	0,0782	1479
20	2,0	22,6	34,1	21,34	10,25	13,0	1,268	1,60	0,0708	1492
21	2,0	24,6	31,8	19,76	10,25	12,9	1,259	1,61	0,0654	1513
22	2,0	25,6	35,9	22,05	10,2	13,0	1,275	1,63	0,0637	1535
23	2,0	26,6	36,1	22,39	10,25	13,0	1,268	1,61	0,0605	1502

Выводы

Исследования показали, что оптимальными параметрами процесса высокоэнергетического формования, позволяющими на графитопластовых композициях достичь максимальной плотности прессовок, являются параметры скорости 3÷3,5 м/с и энергий 1600÷2200 Дж. Необходимо дальнейшее изучение пресс-форм по установлению оптимальных значений отношения массы прессовки к массе ударника.

⁵ Исследования выполнили Иванов В.А. и Яров Б.А.

Список литературы

1. Skoglung, P. High density PM parts by high velocity compaction / P. Skoglung // Powder metallurgy. – 2001. – 44(3). – P. 199–202.
2. Skoglung, P. HVC punches PM to new mass production limits / P. Skoglung // Met. Powder Rep. – 2002. – №57. – P. 26–30.
3. Azhdar, B. Development of a high velocity compaction process for polymer powders / B. Azhdar, B. Stenberg, L. Kari // Polymer Testing. – 2005. – 24. – P. 909–919.
4. Рогозин, В.Д. Высокоскоростное прессование и спекание порошков керамики $YBa_2Cu_3O_7$ / В.Д. Рогозин, С.П. Писарев, Н.Н. Озеров // Известия ВолгГТУ. – 2011. – Т. 5, № 5. – С. 44–46.
5. Vogler, T.J. Static and dynamic compaction of ceramic powders / T.J. Vogler, Lee M.Y., Grady D.E. // Solids and Structures. – 2007. – vol. 44. – P. 636–658.
6. Рогозин, В.Д. Компактирование взрывом высокоплотных графитовых материалов / В.Д. Рогозин, С.П. Писарев // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – № 6. – С. 57–60.
7. Edser, C. Höganäs promotes potential of high velocity compaction / C. Edser // Metal Powder Report 56. Publication of the Institute of Metals. – 2001. – P. 6.
8. Berglund, T. Tribological evaluation of die materials for high velocity compaction of stainless and stellite powders / T. Berglund, M. Olsson // Metal Powder Report 57. Publication of the Institute of Metals. – 2002. – P. 10.
9. Wang, J.Z. High velocity compaction of electrolytic copper powder / J.Z. Wang, X.H. Qu, H.Y. Yin // The Chinese journal of nonferrous metals. – 2008. – V. 18, issue 8. – P. 1498–1503.
10. Wang, J.Z. Effect of multiple impacts on high velocity pressed iron powder / J.Z. Wang, H.Q. Yin, X.H. Qu // Powder Technology. – 2009. – V. 195, no. 3. – P. 184–189.
11. Wang, J.Z. High velocity compaction of ferrous powder / J.Z. Wang, H.Q. Yin, X.H. Qu // Powder Technology. – 2009. – V. 192. – P. 131–136.
12. Sourion, D. Comparison of conventional and HVC of alumina powders / D. Sourion, P. Goeriot, O. Bonnefoy // Advances in Science and Technology. – <http://www.scientific.net/AST.45.893>.
13. Sethi, G. An overview of dynamic compaction in powder metallurgy // G. Sethi, N.S. Myers, R.M. German // International Materials Reviews. – 2008. – vol. 53, № 4. – P. 219–234.
14. Bayle, J.P. High velocity compaction: comparison with conventional compaction for new press development in hot cell pellet manufacturing / J.P. Bayle, F. Jorion // Procedia Chemistry. – 2012. – vol. 7. – P. 431–443.
15. Yan, Z. High-velocity compaction of titanium powder and process characterization / Z. Yan, F. Chen, Y. Cai // Powder Technology. – 2011. – vol. 203. – P. 1–4.
16. Ming, S. Experimental study on warm powder high velocity compaction / S. Ming, G. Hangjian, X. Zhiyu // J. of Mechanical Engineering. – 2013. – vol. 49, no. 18. – P. 46–51.
17. Yan, Z. Preparation and properties of Ti alloy by high-velocity compaction / Z. Yan, F. Chen, Y. Cai // Powder Technology. – 2013. – vol. 246. – P. 345–350.
18. Li, H. High velocity compaction of Cu composite powder / H. Li, H. Yin, D.F. Khan // Materials and Design. – 2014. – vol. 57. – P. 546–550.
19. Самодурова, М.Н. Статическое и высокоэнергетическое формование углеродных порошковых композиций / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов и др. // Металлург. – 2001. – № 11. – С. 87–91.
20. Самодурова, М.Н. Высокоэнергетическая обработка монолитных и порошковых материалов давлением / М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов и др. // Металлург. – 2013. – № 4. – С. 88–93.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.771.25:669.017:669.15

Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я. Поточная термическая обработка сортового и фасонного проката.

Статья посвящена обзору сведений по технологии и оборудованию для термической обработки двух больших сортаментных групп металлопроката, а именно - сортового проката (катанки, круглого проката в бунтах, арматурного ребристого проката в бунтах и стержнях мерной длины) и фасонного проката в мерных длинах (угловой прокат, швеллер, двутавр и др.). При этом для ряда продукции применяется упрочняющая, а для другого ряда продукции – разупрочняющая термическая обработка, что предопределяет широкое разнообразие оборудования и технологии. При этом анализ оборудования и технологии проводится в историческом аспекте, во времени и основано на их развитии и создании и внедрении усовершенствованных вариантов оборудования и технологии современной термической обработки.

Для фасонного проката, кроме упрочняющей термической обработки, в статье рассмотрен вопрос термической правки несимметричных сложных профилаэрозмеров.

В целом, указанные выше оборудование и технологии термической обработки позволили увеличить прочность до 2,0-2,5 раз с обеспечением относительно высоких пластических, вязких свойств проката в том числе до минус 70 °С. Это обеспечивается применением эффективной технологии прерванной и прерывистой закалки с самоотпуском с использованием тепла прокатного нагрева. С другой стороны, описана технология разупрочнения, которая позволила снизить прочностные характеристики до 1,5 и более раз, а пластические параметры – до 3-х раз за счет технологии термостатирования с низкой скоростью охлаждения.

Применение термической правки фасонного проката обеспечило практическое исключение использования для механической правки профилей ролико-правильных машин.

После проведения литературного анализа и деятельности производителей мелющих шаров показано отставание отечественных изготовителей по обеспечению качественных показателей этой продукции, и доказана перспективность и эффективность внедрения новой технологии поточной термической обработки шаров с использованием термоциклирования.

Рис. 15. Табл. 5. Библ. 39 назв.

Ключевые слова: сортовой и фасонный прокат, упрочняющая и разупрочняющая термическая обработка, термическая правка, термоциклирование, механические свойства.

УДК 621.778

Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Панин Е.А., Койнов Т.А. Разработка и моделирование усовершенствованного совмещенного процесса «прокатка-равноканальное угловое прессование».

Данная работа посвящена моделированию совмещенного процесса "прокатка - равноканальное угловое прессование" в программном комплексе DEFORM-3D и исследованию напряженно-деформированного состояния при реализации данного процесса с целью оценки эффективности использования на выходе из матрицы горизонтальных и вертикальных валков. В ходе сравнительного анализа параметров НДС было выявлено, что использование вертикальных валков на выходе из матрицы в ходе осуществления совмещенного процесса «прокатка- равноканальное угловое прессование», позволяет добиться более благоприятной картины деформирования по всей длине деформируемой заготовки.

Рис. 4. Библ. 10 назв.

Ключевые слова: моделирование, совмещенный процесс, прокатка-равноканальное угловое прессование, напряженно-деформированное состояние, коэффициент Лоде-Надаи, эквивалентная деформация.

УДК 539.3

Колмогоров Г.Л., Акулова А.А. Прочность и предельная несущая способность трубобетонных колонн.

На основании прочностного расчета предложена методика определения несущей способности трубобетонных колонн при действии основного сжимающего напряжения.

Трубобетонная колонна рассматривается как трансверсально-изотропная композиционная конструкция. При расчете несущей способности использован математический аппарат теории упругости для бетонного сердечника и аппарат механики оболочек для трубы. Несущая способность определяется из условия разрушения оболочки – трубы. В качестве примера приведены результаты расчета несущей способности трубобетонной

колонны для конкретной геометрии стальной трубы в зависимости от предела прочности на растяжение материала трубы для некоторых марок заполняющего трубу бетона.

Рис. 2. Табл. 1. Библ. 6 назв.

Ключевые слова: трансверсально-изотропный композит, трубобетонная колонна, несущая способность, механика теории упругости, механика оболочек, прочность, разрушение.

УДК 621.762.4.04

Босикова Е.Ю., Полякова М.А., Барышников М.П. Технические решения по совершенствованию конструкции порошковой проволоки для улучшения ее технологических свойств.

В статье рассмотрены преимущества применения порошковой проволоки при внепечной обработке стали. Приведено описание технологии изготовления порошковой проволоки профилированием ленты в роликовых волоках с одновременным заполнением порошком. Для улучшения эксплуатационных свойств порошковой проволоки предлагается изменить конструкцию шва. Другим эффективным решением является применение пиротехнического слоя внутри порошковой проволоки. Показано, что внедрение данных мероприятий не требует значительной реорганизации существующего производства.

Рис. 5. Библ. 40 назв.

Ключевые слова: порошковая проволока, внепечная обработка, расплав, технологический процесс, конструкция, совершенствование

УДК 621.778

Малаканов С.А., Железков О.С., Арзамасцева В.А. Моделирование процесса предварительной высадки головки болта.

Наибольшее распространение получили технологические процессы, включающие высадку бочкообразной головки за несколько переходов и обрезку головок. Одним из основных недостатков применяемой технологии является образование отходов (облоя) в количестве 5-8% от объема заготовки. Вследствие действия контактных сил трения между инструментом и заготовкой последняя приобретает бочкообразную форму, что приводит к увеличению объема обрезаемого металла. Предложен способ формирования головки болта заключающийся в том, что цилиндрический образец осаживается между пуансоном и матрицей с коническими торцевыми поверхностями. При соблюдении определенных условий заготовка при осадке сохранит цилиндрическую форму, что будет способствовать уменьшению отходов при обрезке головки. Представлены результаты компьютерного моделирования штамповки головки болта с использованием метода конечных элементов. Рассмотрены различные варианты исполнения рабочих матриц. Применение конической формы рабочей поверхности позволяет уменьшить бочкообразность заготовки до 15%. Сравнивая результаты натурного и численного экспериментов, было установлено, что погрешность вычислений не превышает 9 %.

Рис. 4. Библ. 7 назв.

Ключевые слова: штамповка головки болта, конечно-элементное моделирование, бочкообразность, облой, коническая рабочая поверхность, матрица

УДК 621.771

Шубин И.Г., Шубина Н.И. К вопросу конструирования канатов с учетом их механических и эксплуатационных характеристик.

Рассмотрен вопрос конструирования канатов с учетом их механических и эксплуатационных характеристик. Разработана математическая модель учитывающая специфику конструкций различных типов каната. Приведенные примеры использования предлагаемой модели позволяют проводить выбор типа конструкции каната или его диаметра при заданных значениях эксплуатационных характеристик, и учете состояния оборудования, и технологии производства.

Рис. 4. Библ. 9 назв.

Ключевые слова: канат, конструирование, математическая модель, механические свойства, эксплуатационные характеристики.

УДК 621.771

Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н., Железков О.С. Исследование технологии ускоренного охлаждения катанки на проволочном стане

В мировой практике для охлаждения катанки и мелкого сорта после горячей прокатки применяются линии охлаждения с различным количеством и длиной секций. Тепловой режим прокатки в чистовом блоке и траектория охлаждения после прокатки в значительной мере определяют механические свойства катанки. Одна из

основных задач, которую необходимо решить при проектировании участка охлаждения - снижение температурной неоднородности по сечению катанки

Рис. 2. Библ. 14 назв.

Ключевые слова: тепловой режим, воздушное охлаждение, катанка, чистовая группа, механические свойства

УДК 621.778.011

Железков О.С., Мухаметзянов И.Д., Барышников М.П., Малаканов С.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов исследования процесса волочения проволоки трапециевидного сечения в монолитной волоке.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса волочения в монолитной волоке проволоки трапециевидного сечения из заготовки различного диаметра для изготовления пружинных шайб. Использовалась исходная заготовка из стали 40С2А круглого сечения с диаметром 11-13 мм. Определены усилия волочения.

Рис. 6. Библ. 6 назв.

Ключевые слова: проволока трапециевидного профиля, пружинные шайбы, процесс волочения, монолитная волока, метод конечных элементов, усилие волочения, технологическая схема

УДК 669.771

Голубчик Э.М., Тарасов П.П. Оценка влияния химического состава на механические свойства металлопроката из высокопрочных двухфазных микролегированных сталей.

В настоящее время получают дальнейшее развитие технологии производства металлопроката из новых современных высокопрочных марок стали, широко востребованных, в частности, в автомобилестроении. Примером могут служить двухфазные стали марок НСТ780Х, НСТ980Х. Учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» в кооперации с ведущими специалистами ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» проводятся исследования по разработке и освоению технологии производства холоднокатаных полос из данных материалов. В работе представлены результаты комплексных исследований влияния химического состава высокопрочных сталей на формирование механических свойств металлопроката в процессе его дрессировки. Показано влияние отдельных элементов химического состава стали марок НСТ780Х, НСТ980Х, произведенной в линии непрерывного отжига, на конечные механические свойства металлопроката.

Рис. 2. Табл. 7. Библ. 14 назв.

Ключевые слова: высокопрочные автомобильные стали; дрессировка, механические свойства, химический состав.

УДК 621.778: 658.652

Ширяев О.П., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г. Особенности применения интервальной математики при управлении качеством продукции в технологиях метизного производства.

Для эффективного решения задач по управлению показателями качества необходимо иметь математические модели, формально описывающие взаимосвязи между параметрами управления процессом обработки и показателями качества изделий, на основе которых возможно определять результативные режимы производства. Показано, что учет неопределенности исходных данных при моделировании технологических процессов метизного производства может быть выполнен на основе методов интервального анализа. Предложен показатель неопределенности эмпирической модели, связанный с неполнотой и неточностью измерений - ошибка результата моделирования. Применение данного показателя позволяет сделать технологический процесс результативнее в качестве получения готовой продукции с заданным набором потребительских свойств.

Библ. 8 назв.

Ключевые слова: интервальная математика, качество продукции, метизное производство, моделирование, математическая модель

УДК 621.771

Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Исследование модульно-комбинированного процесса волочения углеродистой проволоки по схеме «квадрат-круг»

Основным способом производства проволоки является волочение в монолитных волоках, однако волочение имеет ряд недостатков. Для повышения ресурса пластичности и обеспечения более равномерного напряженно-деформированного состояния проволоки предложен модульно-комбинированный процесс волочения проволоки.

Выполненные промышленные эксперименты подтверждают, что новый способ позволяет получать стальную проволоку более высокого качества, чем это возможно при традиционном волочении. Высокий уровень свойств проволоки обеспечивается за счет многократного чередования двух различных схем деформации. Дополнительно выполнено компьютерное исследование предложенного способа. Изучен характер течения металла при деформации проволоки квадратного сечения в круглой монолитной волоке.

Показано, что внедрение инновационных технологий использующих комбинированные процессы позволяет повысить эффективность сталепроволочного производства и обеспечивает выпуск конкурентоспособной продукции.

Рис. 1. Библ. 13 назв.

Ключевые слова: волочение, монолитная волока, роликовая волока, модульно-комбинированное волочение, напряженно-деформированное состояние.

УДК 669.017:620.197

Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. Потенциодинамические исследования сплава АЖ 4.5, легированного свинцом в среде электролита NaCl.

Потенциодинамическом методом в потенциодинамическом режиме при скорости развёртки потенциала 2 мВ/с исследована анодное поведение сплава АЖ 4.5 (Al+4.5%Fe), легированного свинцом до 1% (мас.) в среде электролита NaCl. Показано, что добавки свинца в два раза снижают скорость коррозии исходного сплава. Электрохимические потенциалы при этом смещаются в положительную область значений. С ростом концентрации хлорид-иона в электролите скорость коррозии сплавов увеличивается.

Рис. 1. Табл. 1. Библ. 8 назв.

Ключевые слова: сплав АЖ 4.5, свинец, потенциодинамический метод, коррозия, среда NaCl, потенциал коррозии, потенциал питтингообразования.

УДК 66.083

Самодурова М.Н., Барков Л.А., Латфулина Ю.С. Исследования процессов высокоскоростного формования порошков на основе графита.

Высокоскоростные процессы формования металлических, керамических и других порошков до сих пор не получили промышленного применения. Многочисленными попытками высокоскоростных формований порошков цветных, черных металлов, керамики и полимеров установлено, что формование при скоростях удара, превышающих 1–2 м/с, сопровождаются такими неблагоприятными явлениями, как запрессовывание в формовках газов и паров жидкостей, содержащихся в исходных порошках, и разрушение формовок. Процессы высокоскоростного формования порошковых материалов до конца 20 века были мало изучены, поскольку еще не были созданы современные, надежные устройства для их экспериментального изучения. Таки устройства были разработаны и созданы только в последние десятилетия шведской фирмой *HYDROPULSOR* и американской фирмой *Instron*. В начале 21 века на этих и других высокоскоростных устройствах были выполнены экспериментальные исследования по формованию металлических, полимерных и углеродных порошков учеными Швеции, Франции, России и Китая. Статья посвящена анализу выполненных экспериментальных исследований на устройствах шведской фирмы *HYDROPULSOR* и американской фирмы *Instron*. Зарубежными исследователями установлены значения кинетической энергии бойков устройств, при которых плотность формовок приближается к теоретической, но без указания составов порошков и характера уплотнения формовок, а также массы бойков и формовок, их плотности при различных значениях скоростей и массы бойков. Таким образом, задача работы состояла в исследовании высокоскоростного формования разных составов композиций на основе графита при оптимальной массе бойков устройств и формовок, а также оптимальной скорости бойков устройств.

Рис. 4. Табл. 5. Библ. 20 назв.

Ключевые слова: исследования, высокоскоростное формование, порошковые материалы, устройства для исследования шведской и американской фирм, порошковые композиции на основе графита, энергия формования, скорость бойка, плотность формовки.

REPORTS

UDK 621.771.25:669.017:669.15

Sychkov A.B., Sheksheyev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ya. Heat treatment in the production stream of round, of rebars and section rolled.

The article provides an overview of information on the technology and equipment for heat treatment of two large product mix groups of metal, namely, long products (wire rod, round bars in coils, reinforcing ribbed rolled in coils and rods cut length) and structural shapes in cut length (angular rolled, channel, I-beams, and others.). For a number of products use of the hardening heat treatment, and for another series of products - softening heat treatment, which pre-determines a wide variety of equipment and technologies.

This analysis of the equipment and technology is carried out in the historical aspect, in of the time and based on their development, the creation and introduction of advanced equipment and technology of options of modern heat treatment.

For of section rolled in addition to hardening heat treatment, in the article considered the question of thermal correction asymmetrical, complex profiles.

In general, the above specified thermal processing, equipment and technology have allowed to increase the strength of 2.0-2.5 times with ensuring relatively high plastic, toughness of rolled to minus 70 ° C. This is achieved by using efficient technology and intermittent or interrupted quenching using heat rolling heating. On the other hand, described the softening technology, which has reduced the strength characteristics up to 1.5 times or more, and plastic options - increase up to 3 times due low cooling rate in thermostat.

The use of heat treatment of section rolled provided a practical exclusion of the use of mechanical correction profiles in roller-straightening of machines.

After the analysis of literary and activity of manufacturers of grinding balls is shown lagging of domestic manufacturers in provide quality indicators of the product, and proved of promising and effective introduction of new technology in-line heat treatment of balls using of thermal cycling.

Fig. 15. Table 5. Bibliograf. 39 names.

Keywords: shapes, sections, hardening and softening heat treatment, thermal straightening, thermal cycling, mechanical properties.

UDK 621.778

Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Koinov T.A. Development and simulation of advanced combined process "rolling - equal channel angular pressing".

This work is devoted to simulation of the combined process "rolling - equal channel angular pressing" in the software complex DEFORM-3D and the research of stress-strain state (SSS) in the implementation of the process in order to evaluate the efficiency of use horizontal and vertical rolls at the output from the matrix. In the comparative analysis of parameters of SSS was revealed that the use of vertical rolls at the exit of the matrix in the implementation of combined process "rolling - equal channel angular pressing", allows you to achieve a more favorable pattern of deformation along the entire length of the deformable workpiece.

Fig. 4. Bibliograf. 10 names.

Keywords: modeling, combined process, rolling-equal channel angular pressing, stress-strain state, Lode-Nadai coefficient, equivalent strain.

UDK 539.3

Kolmogorov G.L., Akulova A.A. The strength and the ultimate bearing capacity of pipe-concrete columns.

Based on the strength calculation the method of determining the load bearing capacity of pipe-concrete columns under the action of the main compressive stress is proposed.

The pipe-concrete column is considered as the transversely isotropic composite structure. The mathematical apparatus of the theory of elasticity is used when calculating the carrying capacity of the concrete core, the mechanic of shells is used for the pipe calculation. The load bearing capacity is determined from the condition of the shell-tube destruction. As an example the calculation's results of determining pipe-concrete column carrying capacity for the particular geometry of the steel pipe according to the tensile strength of the pipe material are shown for some grades of concrete filling pipe.

Fig. 2. Table 1. Bibliograf. 6 names.

Keywords: transversely isotropic composite pipe-concrete column, bearing capacity, elasticity mechanics, mechanic shells, strength, destruction.

UDK 621.762.4.04

Bosikova E.Yu., Polyakova M.A., Baryshnikov M.P. Technical decisions for powdered wire construction development for its technological properties improvement.

The advantages of powdered wire application for steel out-of-furnace processing are presented in the paper. The description of the powdered wire manufacturing technology by sheet metal profiling with simultaneous filling with powdered composition is given. For improving the powdered wire exploitation properties it is proposed to change the kind of the seam. Another effective decision is to use the pyrotechnic layer inside the powdered wire. It is shown that implementation of these innovations doesn't need the considerable reorganization of the manufacturing process.

Fig. 5. Bibliograf. 40 names.

Key words: powdered wire, out-of-furnace processing, melted metal, technological process, construction, development

UDK 621.778**Malakanov S.A., Zhelezkov O.S., Arzamasceva V.A. Modeling the process of pre-stamping the bolt head.**

The most widely used processes of stamping barrel heads for multiple operations and cutting head. One of the main disadvantages of the used technologies is the obtaining of waste in an amount of 5-8% by volume of the preform. Due to the action of contact friction forces between the tool and the workpiece takes the form of barrel, which leads to the increase in the volume of cut metal. A method of forming a bolt head which consists the cylindrical workpiece is deformed between punch and die with conical end surfaces. Under certain conditions during the deformation the workpiece retain a cylindrical shape that will minimize waste when cutting head. Presents the results of computer simulation of stamping of the bolt head using the finite element method. Considered different designs of the instrument. The use of conical working surface can reduce barreling of the workpiece up to 15%. Comparing the results of full-scale and numerical experiments, it was found that the calculation error does not exceed 9%.

Fig. 4. Bibliograf. 7 names.

Keywords: stamping bolt head, finite element modeling, waste, barreling, conical working surface, die

UDK 621.771**Shubin I.G., Shubina N.I. About the constructing of ropes with regard to their mechanical and operational characteristics.**

The question of ropes construction with regard to their mechanical and operational characteristics. A mathematical model which takes into account the specifics of various types of rope constructions was designed. These examples of the proposed model use allow to choose the type of rope construction or its diameter with given characteristics values taking into account equipment condition and production technology.

Fig.4. Bibliograf. 9 names.

Key words: rope, construction, mathematical model, mechanical properties, operational characteristics.

UDK 621.771**Platov S.I., Nekit V.A., Ogarkov N.N., Zhelezkov O.S. Accelerated cooling of wire rods after hot rolling.**

In general cooling lines with different number and length of sections are applied for the cooling of wire rods and light section products after hot rolling. The thermal mode of rolling in the finishing mill and the cooling path after rolling largely determines the mechanical properties of the wire rod. One of the main challenges in the design phase of cooling is reducing the non-uniformity of temperature in the tranverse section of wire rod. The present work is oriented to the study of the thermal processes in the cooling line of wire rod light section products mills to improve the quality of the finished product.

Fig. 2. Bibliograf. 14 names.

Keywords: thermal conditions, air cooling, wire rod, finishing block, mechanical properties

UDK 621.778.011**Zhelezkov O.S., Mukhametzyanov I.Sh., Baryshnikov M.P., Malakanov S.A. Comporative analysis theoretical and experimental results research process wire drawing trapezoidal in the monolithic portage.**

Theoretical and experimental studies of the process of drawing in a monolithic portage wire of trapezoidal blanks of different diameters for producing spring washers. Isa-used the original billet steel 40S2A circular cross section with diameters rum $11 \div 13$ mm. Determined effort drawing.

Fig. 6. Bibliograf. 6 names.

Keywords. Trapezoidal wire, spring washers, drawing process, monolithic portage, finite element method, drawing the force flow diagram.

UDK 669.771**Golubchik E.M., Tarasov P.S. Evaluation of the influence of chemical composition on mechanical properties of rolled metal of high strength microalloyed forging steels in two-phase.**

Currently receive further development of production technology of metal-roll of the new advanced high strength steel grades is widely popular, in particular in the automotive industry. Examples are biphasic steel grades HCT780X, HCT980X. Scientists Nosov Magnitogorsk State Technical University in cooperation with the leading specialists of OJSC "Magnitogorsk iron and steel works" studies are under way on the elaboration and development of production technology of cold-rolled strips from these materials. The paper presents the results of a comprehensive study of the influence of chemical composition on formation of high strength steels for mechanical properties of rolled steel during tempering. The influence of individual elements of the chemical composition of steel grades HCT780X, HCT980X, produced in the continuous annealing line, the final mechanical properties of rolled metal.

Fig. 2. Table 7. Bibliograf. 40 names.

Key words: high-strength automotive steel; training, mechanical properties, chemical composition.

UDK 621.778:658.652**Shiryev O.P., Korchunov A.G., Pivovarova K.G. Peculiarities of application the interval mathematics at product quality management in metal ware technologies.**

For effective problem solving in quality indices management it is necessary to use mathematical models which formally describe interactions between processing control parameters and product quality indices. This makes it possible to define the effective technological conditions. It is shown that registration the uncertainty of as received data dur-

ing metal ware technological processes simulation can be implemented on the basics of interval analysis methods. The error of simulation result was proposed as the index of the empirical model uncertainty connected with incompleteness and inaccuracy of measurements. Using this index makes it possible to improve the technological process effectiveness in the sense of manufacturing the product with the specified set of consumption properties.

Bibliograf. 8 names.

Key words: interval mathematics, product quality, metal ware production, simulation, mathematical model

UDK 621.771

Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. Investigation the carbon steel wire module and combined drawing process due to scheme "square-circle".

The main method of production is wire drawing in the monolithic drawing dies, but drawing has a number of drawbacks. To increase the plasticity resource and to ensure a more uniform stress-strain state of the wire is provided a modular combined wire drawing process.

Completed industrial experiments confirm that the new method makes it possible to obtain a steel wire of higher quality than is possible with traditional drawing. The high level properties of the wire is provided through repeated alternation of two different deformation schemes. Computer further configured study of the proposed method. The character of the metal flow during deformation square wire in a circular monolithic die.

It is shown that the introduction of innovative technologies using combined methods can improve the efficiency of the production of steel wire and ensures the production of competitive products.

Fig.1. Bibliograf. 13 names.

Keywords: drawing, wire die, roller die, modular combined drawing, stress-strained state.

UDK 669.017:620.197

Odinaev F.R., Ganiev I.N., Safarov A.G., Yakubov U.Sh. Potentiodynamic studies of alloys potentiodynamic study of 4,5 alloy doped plumbum in medium electrolyte NaCl.

Potentiodynamic method in potentiodynamic scan mode at a rate of capacity 2 mV / s was investigated alloy anodic behavior AF 4.5 (Al + 4.5 % Fe), plumbum-doped to 1% (wt.) In NaCl electrolyte medium. It is shown that the addition of plumbum twice reduce corrosion rate of the initial alloy. Electrochemical potentials while shifting in the positive range of values. With increasing concentration of chloride ion in the electrolyte increases the corrosion rate of alloys.

Fig. 1. Table. 1. Bibliograf. 8 name.

Keywords: alloy AF 4.5; plumbum; potentiodynamic method; corrosion; electrolyte NaCl; potential corrosion; pitting potential.

UDK 66.083

Samodurova M.N., Barkov L.A., Latfulina Yu.S. Investigation of high velocity compaction processes of powder on base of graphite.

High velocity compaction of metal, ceramic and other powders have no widespread industrial application at the present time. Carrying out a large number of experiments with processes of high velocity compaction with powders of non-ferrous, ferrous metals, ceramics and polymers – showed that formation with speeds of the ram tester more than 1-2 m/s, causes the following adverse effects: pressing of gases and vapors of the liquids containing in initial powders and destruction of the specimens. Processes of High Velocity Compaction (HVC) of powder materials have not been studied properly until the creating of modern, reliable devices for their experimental studying at the end of the XX century. Such devices were developed and created in the last decades by the Swedish firm HYDROPULSOR and the American firm Instron. At the beginning of the 21 century different experimental studies of the high-speed devices were provided on formation of metal, polymeric and carbon powders by scientists of Sweden, France, Russia and China. The article is devoted to the analysis of the experimental studies on devices of the Swedish firm HYDROPULSOR and the American firm Instron. Foreign researchers established values of devices striker pin kinetic energy at which density of specimens comes nearly to theoretical, but, unfortunately, without indication of powder compositions, kind of specimens pressing and also strikers and specimens masses, their density at various values of speed and mass of strikers. Therefore the aim of the article is studying processes of High Velocity Compaction providing different indications of powder compositions containing graphite and optimized strikers and specimens masses, strikers speed.

Fig. 4. Table. 5. Bibliograf. 20 name.

Keywords: investigations, high velocity compaction, powder materials, devices for investigations of Swedish and American companies, powder compositions on base of carbon, energy of compaction, velocity of hammer, density of shaping.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акулова Анна Алексеевна – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

Арзамасцева Вероника Айваровна - аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Барков Леонид Андреевич – д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Барышников Михаил Павлович - канд. техн. наук, профессор кафедры «Технологий обработки материалов», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: arcsmag@mail.ru.

Босикова Елена Юрьевна – лаборант, центральная заводская лаборатория, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: bossikova.elena@yandex.ru.

Галлямов Денис Эдуардович – аспирант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Круг научных интересов: проблемы получения высококачественной стальной проволоки и совершенствование процесса волочения. Магнитогорск, Россия. E-mail: gallyamov2010@gmail.com.

Ганиев Изатулло Наврузович – д-р хим. наук, Профессор, зав. лабораторией, Институт химии им. В.И. Никитина, академик АН Республики Таджикистан, E-mail: ganiev48@mail.ru.

Голубчик Эдуард Михайлович - д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологий обработки материалов», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Тел. 8(3519)29-85-12. E-mail: golub66@mail.ru.

Железков Олег Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ferumoff@mail.ru.

Камалова Гюзель Ягафаровна - аспирант кафедры ЛПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: 174kamalova@mail.ru.

Койнов Тончо Атанасович – д-р техн. наук, профессор, Университет химической технологии и металлургии, г. София, Болгария.

Колмогоров Герман Леонидович – заслуженный работник Высшей школы РФ, д-р техн. наук, профессор, действительный член РАЕН, профессор кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия. E-mail: dpm@pstu.ru.

Корчунов Алексей Георгиевич - д-р техн. наук, профессор, проректор по международной деятельности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Латфулина Юлия Сергеевна – аспирант, инженер-исследователь НОЦ «Ресурсный центр спецметаллургии», Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Лежнев Сергей Николаевич - канд. техн. наук, доцент, Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Республика Казахстан. E-mail: sergey_legnev@mail.ru.

Малаканов Сергей Александрович – канд. техн. наук, начальник ОМСР, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. г. Магнитогорск, Россия. Тел.: 8(3519) 29-84-43. E-mail: samalakanov@mail.ru.

Малашкин Сергей Олегович – аспирант кафедры ЛПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shtirlic21999@mail.ru,

Мухаметзянов Ильдар Шамилевич – аспирант, каф. ТМиСМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ildarik-777@mail.ru.

Найзабеков Абдрахман Батырбекович – академик, д-р техн. наук, профессор, ректор Рудненского индустриального института. г. Рудный, Казахстан. E-mail: rector@mail.ru.

Некит Владимир Афанасьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Vladimir@Nekit.info.

Огарков Николай Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ogarkovnikolai@mail.ru.

Одинаев Фатхулло Рахматович – научный сотрудник, Физико-технический Институт им. С.У. Умарова, АН Республика Таджикистан.

Панин Евгений Александрович – м.т.н., ст. преп. кафедры ОМД КГИУ, Карагандинский государственный индустриальный университет. г. Темиртау, Казахстан; Университет химической технологии и металлургии, г. София, Болгария. E-mail: cooper802@mail.ru.

Пивоварова Ксения Григорьевна - доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: kgpivovarova@gmail.com.

Платов Сергей Иосифович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: psipsi@mail.ru.

Полякова Марина Андреевна - доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Самодурова Марина Николаевна – канд. техн. наук, Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия.

Сафаров Амиршо Гоибович – канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, Физико-технический Институт им. С.У. Умарова, АН Республика Таджикистан. E-mail: amirsho71@mail.ru.

Сычков Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор кафедры ЛПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: absyckov@mail.ru.

Тарасов Павел Сергеевич – аспирант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. г. Магнитогорск, Россия. E-mail: zed.8@mail.ru.

Харитонов Вениамин Александрович – канд. техн. наук, профессор, кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Круг научных интересов: проблемы модернизации действующих и разработки новых технических процессов изготовления волочением, протяжкой, прокаткой проволоки различного назначения и изделий из неё. г. Магнитогорск, Россия,

Шекшеев Максим Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры ЛПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shecsheev@yandex.ru.

Ширяев Олег Петрович - директор ОАО «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск, Россия.

Шубин Игорь Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: shubin64@mail.ru.

Шубина Наталья Игоревна - аспирант кафедры технологий обработки материалов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Якубов Умарали Шералиевич – магистрант, Институт химии им. В.И. Никитина, Республика Таджикистан. E-mail: 1mar_0205@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Akulova Anna Alekseevna – student, Perm national researching polytechnic university. Perm, Russia.

Arzamasceva Veronika Ajvarovna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia.

Barishnikov Mikhail Pavlovich – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: arcsmag@mail.ru.

Barkov Leonid Andreevich - D.Sc. (Eng.), Professor, National Research South Ural State University.

Bosikova Elena Yuryevna - laboratory assistant and researcher, central factory laboratory, OJSC MMK-METIZ Ul. Magnitogorsk, Russia. E-mail: bossikova.elena@yandex.ru.

Gallyamov Denis Eduardovich - postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Circle of scientific interests: the problem of obtaining high quality steel wire and improving the process of drawing. Magnitogorsk, Russia. E-mail: gallyamov2010@gmail.com.

Ganiev Izatullo – D.Sc. (Eng.), Professor, academic. Academy science of the Republic of Tajikistan, Head of laboratory Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin. Republic of Tajikistan. E-mail: ganiev48@mail.ru.

Golubchik Eduard Mikhailovich - D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: golub66@mail.ru.

Kamalova Guzel Yagafarovna - Postgraduate Student of the Department of Foundry and Materials of Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: 174kamalova@mail.ru.

Kharitonov Veniamin Aleksandrovich - Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Circle of scientific interests: problems of modernization of existing and development of new technological processes of manufacturing drawn bars, wire, roll wire of different purposes and products of it. Magnitogorsk, Russia.

Kholmogorov German Leonidovich – D.Sc. (Eng.), Professor, valid member of RANS, professor of chair “Dynamics and strength of machines”, Perm national researching polytechnic university. Perm, Russia. E-mail: dpm@pstu.ru.

Koinov Toncho Atanasovich – D.Sc. (Eng.), Professor, University of chemical technology and metallurgy, Sofia, Bulgaria.

Korchunov Alexey Georgevich – D-r of technical science, vice-rector for International Relations, «Nosov Magnitogorsk State Technical University», Russia. E-mail: agkorchunov@mail.ru.

Latfulina Ylia Sergeevna - Postgraduate Student, National Research South Ural State University. E-mail: latfulina174@gmail.com.

Legnev Sergey Nikolaevich - Ph.D. (Eng.), associate Professor, Karaganda state industrial university, Temirtau, Republic of Kazakhstan. E-mail: sergey_legnev@mail.ru.

Malakanov Sergey Aleksandrovich - Ph.D. (Eng.), Head OMSR, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: samalakanov@mail.ru.

Malashkin Sergey Olegovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: shtirlic21999@mail.ru.

Mukhametzhanov Ildar Shamilevich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: ildarik-777@mail.ru.

Nazaybekov Abdrakhman Batyrbekovich – Academician, D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Rudny Industrial Institute, Kazakhstan. E-mail: rector@mail.ru.

Nekit Vladimir Afanasievich - Ph.D. (Eng.), associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: Vladimir@Nekit.info.

Odinaev Fathullo Rahmatovich – Researcher Institute of Physico-technical named after S.U. Umarova AS Republic of Tajikistan.

Ogarkov Nikolay Nikolayevich - D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: ogarkovnikolai@mail.ru.

Panin Evgeniy Aleksandrovich – m.t.s., senior teacher of “Metal Forming”, Karaganda state industrial university, Temirtau, Republic of Kazakhstan; University of chemical technology and metallurgy, Sofia, Bulgaria. E-mail: cooper802@mail.ru.

Pivovarova Kseniya Grigorevna – Ph.D. (Eng.), the associate professor, associate professor of Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: kgpivovarova@gmail.com.

Platov Sergey Iosifovich - D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department Machines and Metal Forming Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: psipsi@mail.ru.

Polyakova Marina Andreyevna - Ph.D. (Eng.), the associate professor, associate professor of Materials Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova-64@mail.ru.

Samodurova Marina Nikolaevna - Ph.D. (Eng.), National Research South Ural State University. E-mail: sm@susu.ac.ru.

Safarov Amirsho Gaibovich – leading researcher Institute of Physico-technical named after S. U. Umarova AS Republic of Tajikistan. E-mail: amirsho71@mail.ru

Sheksheyev Maxim Aleksandrovich - Ph.D. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shecsheev@yandex.ru.

Shiryev Oleg Petrovich – director OAO “MMK-METIZ”. Magnitogorsk. Russia.

Shubin Igor Gennad’evich – Ph.D. (Eng.), associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk. Russia. E-mail: shubin64@mail.ru.

Shubina Natalia Igorevna – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk. Russia.

Sychkov Alexander Borisovich - D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: absychkov@mail.ru.

Tarasov Pavel Sergeevich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: zed.8@mail.ru.

Yakubov Umarali Sheralievich – Undergraduate Institute of Chemistry named after V.I. Nikitina AS Republic of Tajikistan. E-mail: 1mar_0205@mail.ru.

Zhelezkov Oleg Sergeevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!
МЫ ПРИГЛАШАЕМ ВАС К УЧАСТИЮ В НАШЕМ ЖУРНАЛЕ В КАЧЕСТВЕ
АВТОРОВ, РЕКЛАМОДАТЕЛЕЙ И ЧИТАТЕЛЕЙ

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (100-250 слов). Включает гипотезу, цель, эксперименты и методы, основные результаты, применение результатов исследования в промышленности (излагается в прошедшем времени).

Онлайн - перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы).

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки.

2.3. Результаты исследования и их обсуждение.

2.4. Заключение (выводы).

2.5. Список литературы (на русском и английском языках) по ГОСТ Р 7.0.5-2008.

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6-8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуется следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 12 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов - автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **рисунки и фотографии**, вставленные в документ, должны быть четко выполнены, допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров (толщины линий и размеры обозначений должны обеспечивать четкость при уменьшении рисунка до рациональных размеров), в форматах *.TIF, *.JPG, с разрешением **не менее 300 dpi**, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов. Максимальный размер рисунка с подписью – 150x235 мм. В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков, по центру текста. Например:

Рис. 4. Расчетная зависимость $\gamma(t) = I_{nt} / I_{n0}$ от времени и удаленности КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Рецензия.

4.2. Экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати на бланке, с подписями, печатью.