

На правах рукописи

Шинкарев Александр Сергеевич

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ
ЛИСТОВ

05.02.09 - Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Колесников Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана»,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Официальные оппоненты: Шаталов Роман Львович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»
/Университет машиностроения/, кафедра
«Машины и технологии обработки металлов
давлением»

Матросов Максим Юрьевич,
кандидат технических наук,
директор Центра сталей для труб и сварных
конструкций ФГУП «ЦНИИчермет имени
И.П.Бардина»

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет МИСиС»

Защита диссертации состоится « 30 » июня 2015 г. в 16 час. 00 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5.

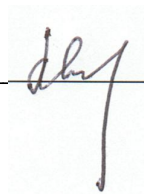
Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан « » мая 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время интенсивные научные исследования и разработки ведутся в направлении создания материалов с ультрамелкозернистой структурой (менее 1 мкм). Практические успехи применения материалов с ультрамелкозернистой структурой отмечены в таких отраслях как наноэлектроника, приборостроение и микроэлектромеханика, медицина и др. Однако материалы, применяемые в указанных отраслях, изготавливаются в виде малоразмерных заготовок и предназначены для работы в приборных устройствах при щадящих условиях эксплуатации.

Наряду с этим возникает **проблема** формирования совокупности механических, эксплуатационных и специальных свойств деталей из массивных заготовок. Стабильное ультрамелкозернистое состояние конструкционных материалов, работающих в условиях повышенных температур, ударных, знакопеременных нагрузок и пр., позволяет значительно улучшить технические характеристики изделий новой техники.

Изучением теоретических и технологических аспектов создания таких материалов занимались Н. П. Лякишев, Герберт Глейтер, Карл Кох, М. И. Алымов, Р. А. Андриевский, В. М. Сегал, Р. З. Валиев, Я. Е. Бейгельзимер, В. П. Майборода, В. С. Копань, А. В. Лысенко, А.М. Глезер, М. И. Карпов, В. С. Крапошин, А. Г. Колесников, А. И. Плохих, А. И. Рудской

Для производства машиностроительных заготовок требуется разработка дешевых и производительных технологических процессов. Среди них особое место занимает листовая прокатка - наиболее производительный процесс, обладающий высочайшей степенью автоматизации и позволяющий получать точные и дешевые изделия. Данная работа посвящена разработке технологии получения заготовок со стабильной ультрамелкозернистой структурой методом прокатки многослойных листов.

Промышленностью освоено производство многих видов слоистого проката. Число слоев в таких материалах обычно не превышает 10, при этом толщина слоев, как правило, колеблется от десятков миллиметров до нескольких микрометров, что существенно выше ультрамелкозернистого диапазона. В связи с этим возникает интерес к созданию супермногослойных листовых заготовок, в которых толщина слоя сопоставима с характерным размером ультрадисперсного зерна. Однако до настоящего времени недостаточно сведений о технологических режимах обработки и закономерностях формирования свойств в материалах такого рода, полученных листовой прокаткой.

В связи с этим работы направленные на создание технологического процесса прокатки многослойных стальных материалов со стабильной ультрамелкозернистой структурой являются актуальными.

Объектом исследования в данной работе является технология получения стальных листов.

Предметом исследования являются режимы и параметры прокатки многослойных стальных материалов с ультрамелкозернистой структурой.

Целью работы является получение стабильной ультрамелкозернистой структуры в стальных материалах путем разработки режимов прокатки многослойных листов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. Обоснование выбора способа прокатки для получения ультрамелкозернистой структуры в стальных листах.

2. Разработка схемы технологического процесса производства листовых материалов со стабильной ультрамелкозернистой структурой методом прокатки.

3. Определение зависимости сопротивления деформации многослойных стальных материалов от параметров прокатки

4. Определение физико-механических характеристик многослойных стальных материалов исследуемых композиций.

5. Разработка рекомендаций для промышленного освоения технологии производства многослойных стальных листов с ультрамелкозернистой структурой.

Получены следующие результаты, характеризующиеся **научной новизной**:

1. Впервые экспериментально определены и исследованы:

- зависимости сопротивления деформации от параметров прокатки многослойных композиций сталей 08кп+У8 и У8+08Х18Н10, знание которых позволяет рассчитывать значения силы деформирования;

- зависимости механических свойств композиции сталей 08кп+У8 от температуры прокатки;

- зависимость виброгасящих свойств многослойных стальных материалов для композиции сталей У8+08Х18Н10 от числа слоев.

2. Разработана научно обоснованная методика расчета режимов прокатки стального листа для получения термически стабильной ультрамелкозернистой структуры.

Практическая значимость: разработаны рекомендации для практического освоения производства стального листа с ультрамелкозернистой структурой на металлургическом предприятии. Результаты исследований используются в учебном процессе в лекциях по курсу «Технологические основы проектирования литейно-прокатных агрегатов», при выполнении курсовых и дипломных проектов на кафедре «Оборудование и технологии прокатки».

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 5-й научно-практической конференции молодых специалистов ОМК. Выкса (ВМЗ), 2012; Международном научно-практическом семинаре «Прогрессивные технологии и оборудование обработки давлением». М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012; 4-й конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». М.: ЦНИИчермет имени И.П.Бардина, 2012; на 4-й, 5-й, 6-й, 7-й Всероссийских конференциях

молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011 -2014. Работа удостоена Второй Премии МГТУ имени Н.Э. Баумана за НИР и Премий Международной промышленной выставки «Металл - Экспо 2013» и «Металл - Экспо 2014».

Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта № 7.1949.2011 «Разработка научных основ создания нового класса конструкционных металлических материалов с ламинарной субмикро- и наноразмерной структурой», выполняемого по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации.

Методы исследований и достоверность результатов:

Теоретические исследования базировались на основных положениях теории продольной прокатки академика А.И. Целикова. Экспериментальные исследования включали измерение энергосиловых параметров прокатки методами тензометрирования и замеры изменения температуры образцов с помощью методов пирометрии. Определение физико-механических свойств материалов проводилось с использованием стандартных методов испытаний на растяжение образцов (ГОСТ 1497-84), испытаний на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78), испытаний на отрыв слоёв, исследования микроструктуры структуры (ГОСТ 5639-82). При обработке данных были использованы методы математической статистики. Экспериментальные исследования по определению силовых параметров процесса прокатки проводились в лаборатории кафедры «Оборудование и технологии прокатки». Механические свойства многослойных материалов исследовались в лаборатории прочности испытательного центра НУК МТ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением стандартных методов и приспособлений с использованием современных приборов и средств измерений. Обоснованность теоретических выводов подтверждена экспериментальными данными, полученными лично соискателем.

Личный вклад автора: проведен анализ современных технологических способов производства листового проката с ультрамелкозернистой структурой, экспериментальные исследования по определению силовых параметров процесса прокатки многослойных стальных листов, осуществил испытания механических свойств многослойных стальных листов с ультрамелкозернистой структурой, разработал методику выбора технологических режимов прокатки многослойного листа с ультрамелкозернистой структурой.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 12 научных работах общим объёмом 2 п.л., в том числе – **4 статьи** опубликованы в изданиях, входящих в перечень **ВАК РФ**.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 119 наименований, приложения. Работа содержит 163 страницы машинописного текста, 89 рисунков и 33 таблицы.

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цели и задачи работы, определена ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ особенностей и технологических проблем измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов, рассмотрены различные схемы получения ультрамелкозернистых и наноструктурированных металлических материалов, проведена их классификация. Анализ технологий и оборудования для получения таких материалов показал целесообразность использования методов прокатки как наиболее производительных, характеризующих непрерывностью и обладающих возможностью получения заготовок больших размеров. Возможность производства большегабаритных заготовок с ультрамелкозернистой и наноразмерной структурой на стандартном оборудовании в промышленных объемах является ключевым преимуществом метода прокатки перед остальными методами обработки давлением.

Для ультрамелкозернистых материалов актуальной является проблема удержания структуры и сдерживания роста зерна при нагреве, так как при измельчении зерна пластической деформацией происходит понижение температуры начала рекристаллизации. По результатам анализа сделан вывод, что оптимальным вариантом получения стабильной ультрамелкозернистой структуры листовых материалов является создание слоистых материалов с несмешиваемыми слоями. Разработанные в МГТУ имени Н.Э.Баумана принципы прокатки многослойных листовых наноструктурированных материалов на основе сталей открывают возможность создания нового класса конструкционных материалов со слоистой наноразмерной структурой, созданных на основе сплавов одного металла.

Во второй главе приведены характеристики использованных при проведении экспериментов материалов, описываются методы теоретических и экспериментальных исследований, примененные приборы и оборудование.

Технология получения многослойных листов с устойчивой ультрамелкозернистой структурой основана на многократной горячей прокатке заготовки в виде композиции, состоящей из чередующихся металлических листов. Принципиальным условием реализации такой технологии является существование при заданной температуре прокатки разных кристаллографических модификаций в соседствующих листах композиции (Рисунок 1).

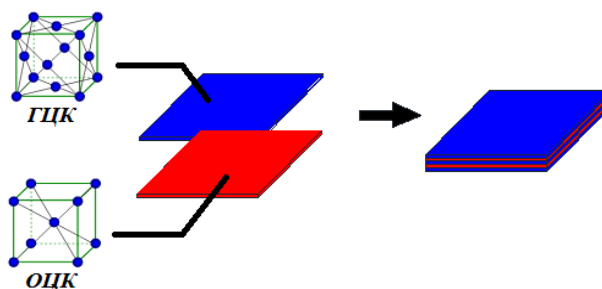


Рисунок 1. Кристаллические модификации в слоях стали

Возможны также и следующие варианты:

- выбор химического состава сплавов, составляющих исходную заготовку, осуществляется исходя из значений термодинамической активности основных легирующих элементов, обеспечивающих минимальную межслойную диффузию наиболее подвижного легирующего элемента;

- в другом случае сплав, претерпевающий полиморфные превращения, должен иметь упрочняющую фазу, температура растворения которой находится выше температуры его полиморфного превращения, и температура прокатки должна находиться в диапазоне между температурой окончания полиморфного превращения и началом растворения упрочняющей фазы.

В рамках данной работы объектами исследования являлись железные сплавы в виде листового проката толщиной 0,5 мм из сталей 08кп, У8, 08Х18Н10. Технологический маршрут получения многослойных листов с ультрамелкозернистой структурой включает мерную резку листовых заготовок, обработку их поверхности, сборку чередующихся разнородных пластин в капсулу, вакуумирование и горячую прокатку до исходной (или заданной) толщины. Описанный цикл повторяется с той разницей, что заготовками для последующего цикла служат прокатанные многослойные полосы предыдущего цикла. Количество таких циклов определяется необходимой толщиной одного слоя в многослойном листе (например, до 1 мкм).

Теоретические исследования посвящены анализу энергосиловых параметров процесса деформирования при прокатке многослойных материалов. В качестве базовой теории, применяемой в данном анализе, выбрана теория академика А. И. Целикова применительно к продольной прокатке монолитного листа. Выбор обусловлен широкой известностью теории, высокой точностью получаемых результатов и удобством использования. Аналитическое исследование процесса прокатки многослойного листа базировалось на следующих допущениях:

- 1). Композиция из чередующихся слоев представляется в виде однородного эквивалентного материала. Основанием для такого подхода служит получение надежного соединения слоев уже в первых проходах прокатки в условиях вакуума при высокой температуре.

- 2). Величина фактического сопротивления деформации эквивалентного материала принимается усредненной по сечению по отношению к составляющим композиции.

Усреднение величины фактического сопротивления деформации $\sigma_{ф.ср.}$ проводилось в соответствии с зависимостью, рекомендованной для случая прокатки биметаллов:

$$\sigma_{ф.ср.} = \frac{\sigma_{ф.т.} \cdot h_t + \sigma_{ф.м.} \cdot h_m}{h_t + h_m}, \quad (1)$$

где: $\sigma_{ф.т.}$ – фактическое сопротивление деформации твердого материала, $\sigma_{ф.м.}$ – фактическое сопротивление деформации мягкого материала, h_t – толщина твердого материала, h_m – толщина мягкого материала.

При расчете усредненной величины фактического сопротивления деформации композиции по формуле (1), значения $\sigma_{ф.т.}$ и $\sigma_{ф.м.}$ рассчитывались при помощи метода термомеханических коэффициентов.

Экспериментальные исследования процесса прокатки многослойных композиций преследовали цель сопоставления значений сопротивления деформации, полученных в ходе теоретического анализа, с реальными значениями. В данной работе исследовались три композиции многослойных материалов: 1 - (08кп + У8), 2 - (08кп+ 08Х18Н10) и 3 - (08Х18Н10 + У8).

Исследования процесса прокатки, результаты которых изложены в третьей главе, включали измерение энергосиловых параметров методами тензометрирования и замеры изменения температуры образцов с помощью методов пирометрии. Размеры образцов, прокатываемых на стане с диаметром бочки 160 мм, составляли в сечении 50 мм x 50 мм и длиной 200 мм.

В данной главе приведено описание методов и оборудования для определения физико-механических свойств материалов. Использовались стандартные методы испытаний на растяжение образцов (ГОСТ 1497-84), испытаний на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78), испытаний на отрыв слоёв, исследования микроструктуры структуры (ГОСТ 5639-82). При обработке данных были использованы методы математической статистики.

В третьей главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований энергосиловых параметров процесса горячей прокатки многослойных стальных материалов, а также результаты испытаний этих материалов на растяжение, статический и ударный изгиб. Представлены экспериментальные данные о межслойной прочности, микроструктуре и виброгасящих свойствах исследуемых многослойных листов. Рассмотрены условия сохранения слоистой структуры.

Наблюдения за изменением макроструктуры многослойных заготовок в зависимости от режимов обжата показывают следующее: в определенном диапазоне обжатий сохраняется параллельное расположение; при превышении критических значений обжата заготовки слои перемешиваются. Структуру многослойных заготовок с несмешиваемыми слоями, ориентированными параллельно направлению прокатки, принято называть ламинарной структурой. Для получения ультрамелкозернистой структуры в слоистых материалах необходимо избегать взаимного проникновения слоев с различной кристаллической структурой, что обеспечивается сохранением целостности межслойных границ и ламинарностью структуры листового материала.

Экспериментальная оценка критической величины обжата, при которой происходит искажение многослойной структуры, показала следующее. При многопроходной прокатке многослойных исследованных композиций величина относительного обжата принимается равной 10% в каждом проходе. В качестве примера приведена структура многослойного листа (У8 + 08Х18Н10), прокатанного с 10%-м обжатием в каждом проходе до толщины равной 2 мм, толщина отдельного слоя составила 20 мкм. При таких режимах единичных обжатий формируется и устойчиво сохраняется ламинарная

структура (Рисунок 2,а). Увеличение единичных обжатий более 30% существенно искажает ламинарное строение многослойных заготовок (Рисунок 2,б).

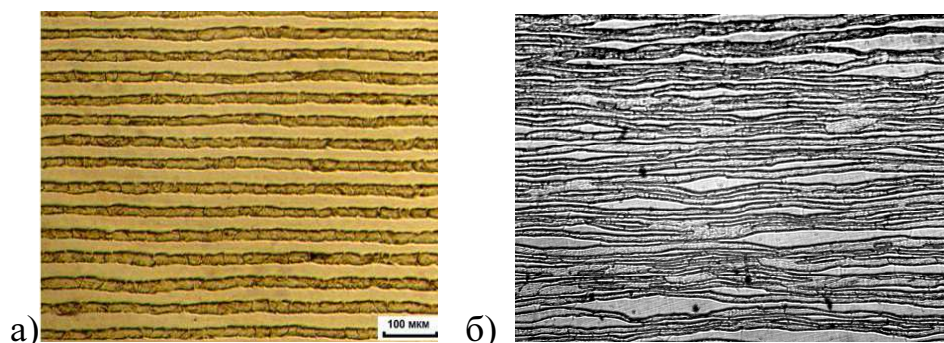


Рисунок 2.Изображение структуры стального многослойного материала

В ходе теоретических исследований энергосиловых параметров процесса горячей прокатки многослойных стальных материалов проводился расчет сил прокатки по среднему сопротивлению деформации (1) для композиции сталей (08кп + У8) и (У8+08Х18Н10). Для сталей У8 и 08кп на основе справочных данных при температуре равной $T = 1100^{\circ}\text{C}$ и скорости деформации $u = 1 \text{ c}^{-1}$ была построена усредненная диаграмма упрочнения (Рисунок 3). Для композиции У8+08Х18Н10 аналогичным образом при температуре равной $T = 1000^{\circ}\text{C}$ и скорости деформации $u = 0,5 \text{ c}^{-1}$ получаем усредненную зависимость упрочнения, показанную на Рисунке 4.

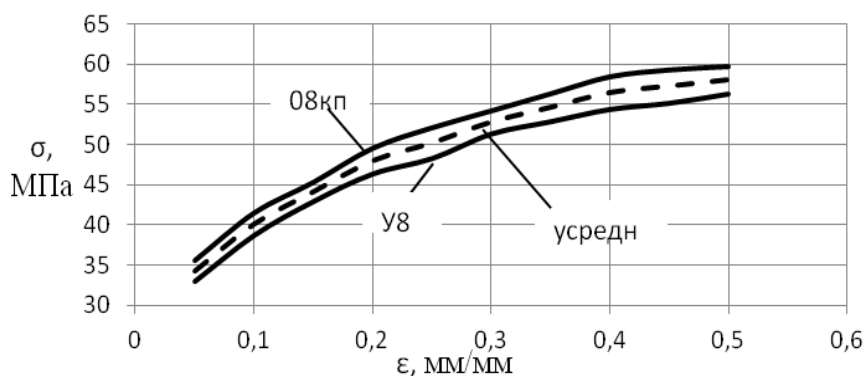


Рисунок 3. Диаграмма упрочнения для сталей У8 и 08кп ($T = 1100^{\circ}\text{C}$, $u = 1 \text{ c}^{-1}$)

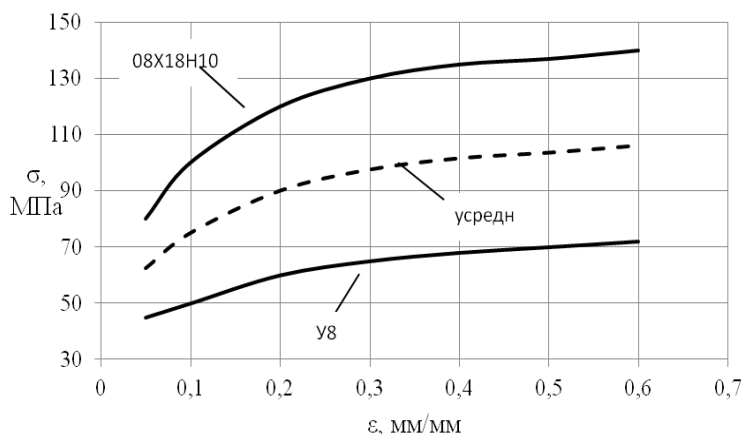


Рисунок 4. Диаграмма упрочнения для сталей У8 и 08Х18Н10 ($T = 1000^{\circ}\text{C}$, $u = 0,5 \text{ c}^{-1}$)

На основе полученных результатов были определены средние значения сопротивления деформации выбранных композиций сталей для различных скоростей деформации $u = 0,9 \div 2 \text{ с}^{-1}$. По полученным значениям рассчитаны величины сил прокатки, графики изменения которых в зависимости от суммарного относительного обжатия $\varepsilon_{\Sigma} = \Delta h / h_0$ представлены на Рисунках 5 и 6.

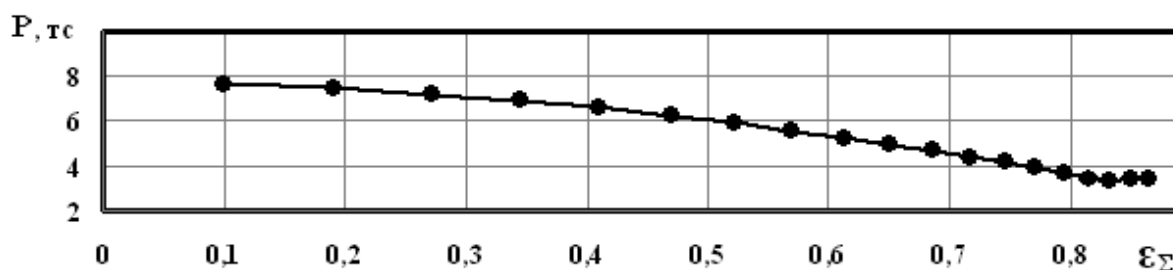


Рисунок 5. Зависимость сил прокатки от суммарного относительного обжатия, полученная по усредненному сопротивлению деформации сталей 08кп и У8

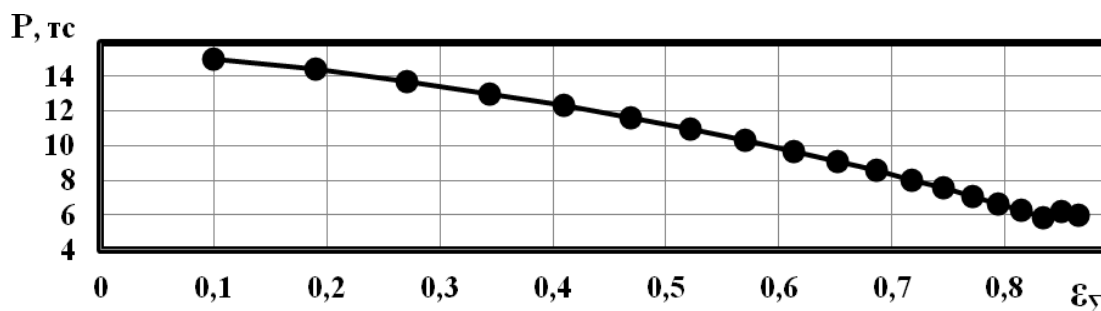


Рисунок 6. Зависимость сил прокатки от суммарного относительного обжатия, полученная по усредненному сопротивлению деформации сталей У8 и 08Х18Н10

Экспериментальная часть посвящена сравнению расчетных значений силовых параметров прокатки с опытными данными и исследованию степени влияния слоистой структуры и химического состава слоев, образующих композицию, на свойства материала. Экспериментальные измерения сил прокатки производились на образцах композиций 08кп+У8 и У8+08Х18Н10. Все слоистые образцы предварительно вакуумировались в герметичных капсулах до степени разряжения 10^{-2} мм рт. ст. Температура прокатки композиций различалась. Для композиции сталей 08кп и У8 была выбрана равной $T = 1100^{\circ}\text{C}$, для композиции сталей У8+08Х18Н10 была выбрана равной $T = 1000^{\circ}\text{C}$.

Для выяснения температурных условий проведения экспериментальных прокаток были проведены измерения: температура на входе в стан и выходе из него регистрировалось с помощью пирометров, температура в очаге деформации с помощью тепловизора. На графике изменения температуры (Рисунок 7) можно выделить два характерных участка: температура заготовки при толщине от 7 до 50 мм остается примерно постоянной, на участке при толщине заготовки менее 7 мм отмечается резкое падение температуры.

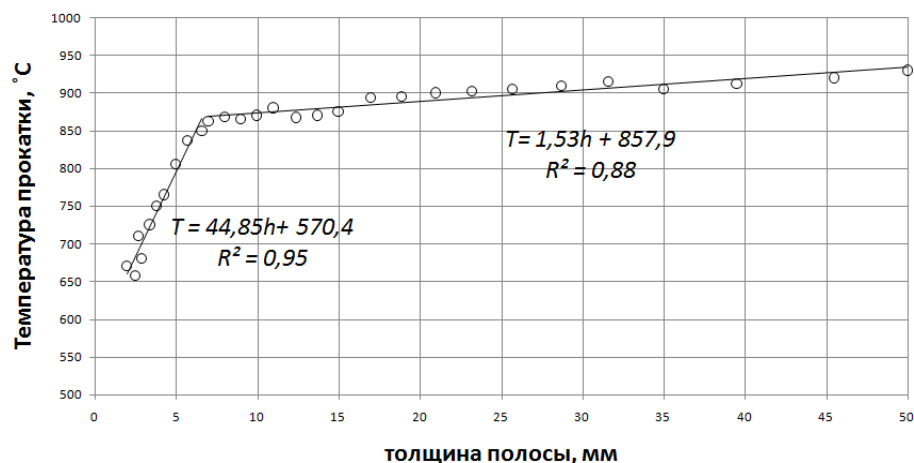


Рисунок 7. Средняя температура заготовки в зависимости от ее толщины

Для исследований композиции сталей 08кп+У8 были подготовлены три вида образцов размерами по высоте, ширине и длине 53 мм x 53 мм x 200 мм:

1. монолитный кованный образец из стали У8;
2. 100-слойный пакет из листов по 0,5 мм каждый из стали У8;
3. 100-слойный пакет из листов по 0,5 мм каждый на основе композиции сталей 08кп+У8.

Первые два вида образцов одного химсостава предназначены для оценки влияния слоистой структуры. Третий образец прокатывался для выявления зависимости деформирующих сил от разнородного состава чередующихся слоев (композиция 08кп+У8). Все образцы нагревались в камерной печи до температуры 1100°С и прокатывалась на листовом двухвалковом стане с диаметром валков 160 мм при постоянном относительном обжатии в каждом проходе 10±2,5% за 19 проходов до толщины 7 мм со скоростью 0,1 м/с. Нагрев осуществлялся перед каждым проходом. Зависимости изменения силы прокатки от суммарной деформации представлены на Рисунках 8 и 9.

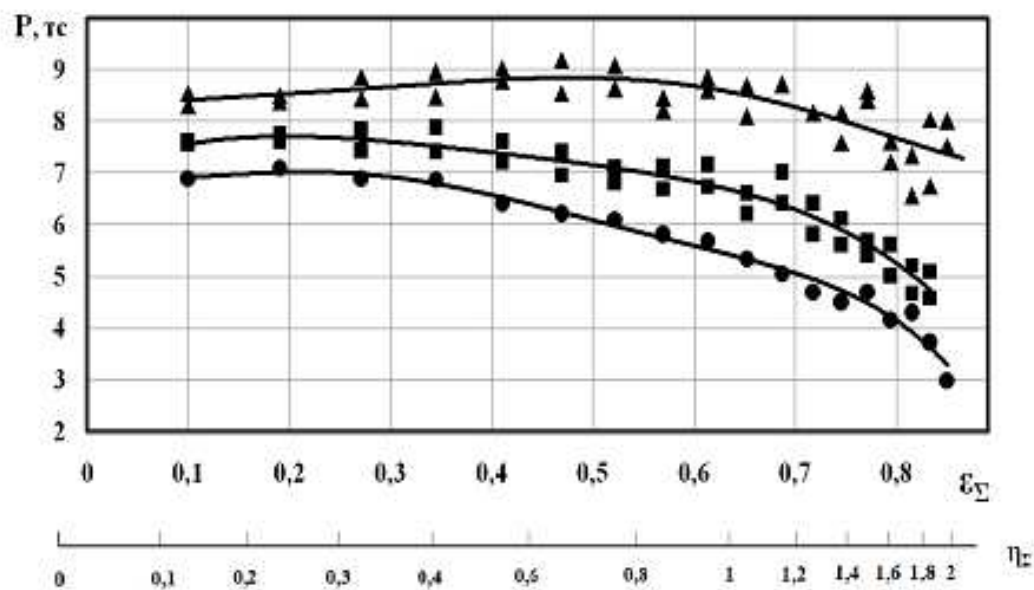


Рисунок 8. Экспериментальные зависимости силы прокатки от суммарной относительной деформации

● – У8-монолит, ■ – У8-слоистый, ▲ – 08кп+У8

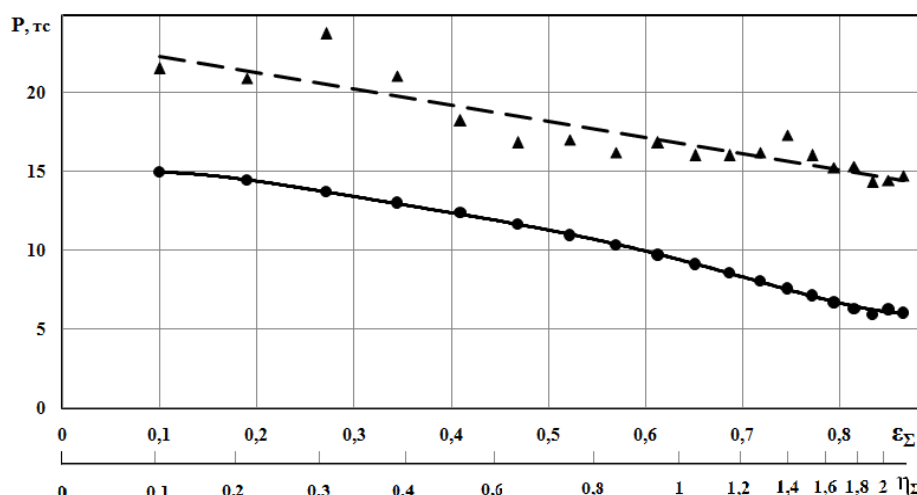


Рисунок 9. Экспериментальные и расчетные значения сил прокатки в зависимости от суммарной относительной деформации для композиции сталей 08X18H10+Y8

▲ – экспериментальные значения для прокатки композиции Y8+08X18H10;

● – расчет по среднему сопротивлению деформации сталей 08X18H10 и Y8.

Суммарная истинная деформация определялась по формуле: $\eta_{\Sigma} = \ln(H_0 / H_i)$, где i – номер прохода, H_0 и H_i – соответственно начальная толщина заготовки, и толщина проката после каждого прохода. Анализ полученных графиков показывает, что при накопительном характере деформаций и одинаковых деформационных, температурных и скоростных условиях прокатки:

1). Значения сил прокатки композиционного материала 08кп+Y8 выше, чем у слоистых заготовок стали Y8 и у монолитного стального образца из стали Y8.

2). Значения сил прокатки слоистого материала композиции сталей (Y8+08X18H10) выше по сравнению с силами, рассчитанными по усредненному сопротивлению деформации исходных материалов.

3). Силы прокатки заготовки, полученной из 100 слоев стали Y8, имеют более высокие значения по сравнению с силами прокатки монолитного образца той же стали.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по прокатке многослойного материала показал существенное влияние слоистой структуры на величину силы прокатки и необходимость корректировки выражения (1). На Рисунках 10 и 11 представлены зависимости $\sigma_{\phi}(\epsilon_{\Sigma})$, рассчитанные по среднепропорциональной величине и формуле (2):

$$\sigma_{\phi} = \frac{P_{\text{экс}}}{\gamma \cdot n_{\sigma} \cdot F}, \quad (2)$$

где $P_{\text{экс}}$ – экспериментальные значения силы прокатки.

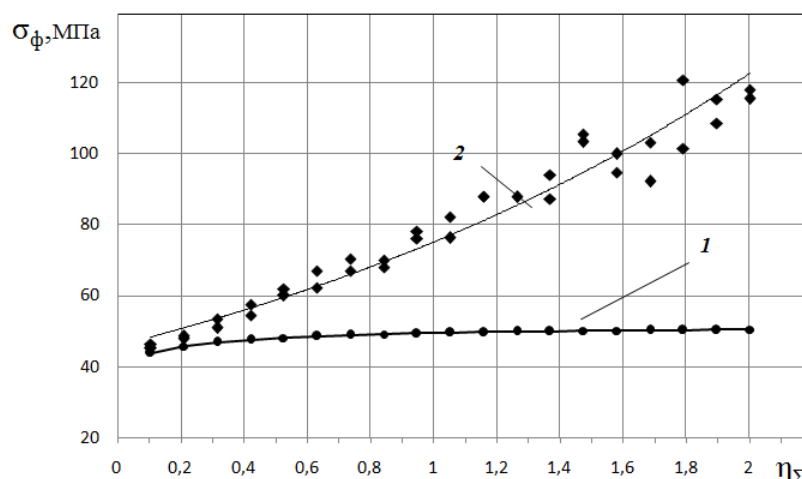


Рисунок 10. Зависимость сопротивления деформации от суммарной деформации для композиции (08кп + У8)

Кривая 1 – расчетные данные, полученное методом термомеханических коэффициентов при $T = 1100^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 10\%$, $u = 0,9 \div 2 \text{ c}^{-1}$. Кривая 2 – экспериментальные данные.

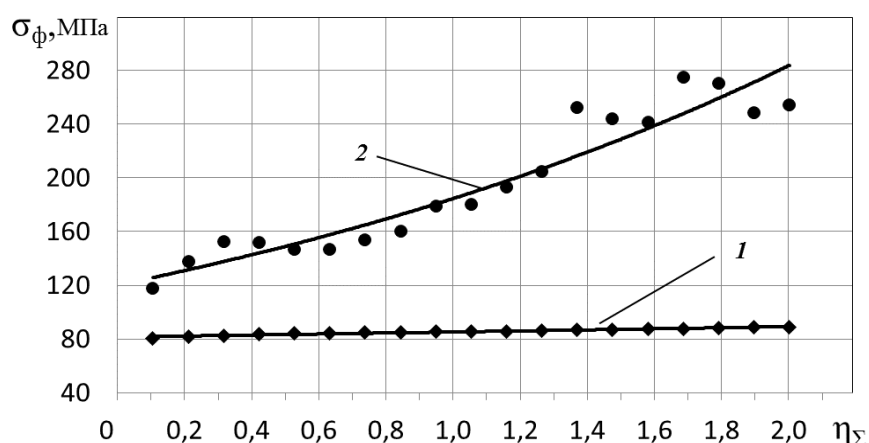


Рисунок 11. Зависимость сопротивления деформации от суммарной деформации для композиции 08X18H10+У8

Кривая 1 – расчетные данные, полученное методом термомеханических коэффициентов при $T = 1000^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 10\%$, $u = 0,9 \div 2 \text{ c}^{-1}$. Кривая 2 – экспериментальные данные.

Кривая 2, отражающая реальную картину упрочнения композиции, демонстрирует более интенсивный рост по сравнению с кривой 1: при достижении суммарной относительной деформации $\eta_{\Sigma} = 2$ текущее значение сопротивления деформации σ_{ϕ} трехкратно превосходит среднепропорциональную величину.

В отличие от биметаллов исследуемый многослойный материал представляет собой совокупность большого числа чередующихся слоев стали, разделенных большеугловыми границами зерен с размерами менее 1 мкм. В данной работе нами выдвинуто предположение о том, что вследствие многопроходной прокатки на границах раздела ультрамелкозернистых слоев нака-

пливаются микронапряжения, которые могут оказывать существенное влияние на физико-механические свойства многослойного стального материала, в частности, на сопротивление деформации.

По результатам аппроксимации при $T_{пр}=1023\div1373\text{К}$, $u=0,6\div5\text{ с}^{-1}$; $\eta_{\Sigma}=0,1\div3,5$ функцию упрочнения слоистого материала композиции (08кп+У8) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{\phi} = 17,39 \cdot e^{1863,62/T} \cdot u^{0,16} \cdot \eta_{\Sigma}^{0,24} \quad (4)$$

Функцию упрочнения для композиции сталей (У8+08Х18Н10) при $T_{пр}=873\div1273\text{К}$, $u=0,6\div5\text{ с}^{-1}$; $\eta_{\Sigma}=0,1\div3,5$ можно представить в виде:

$$\sigma_{\phi} = 126,12 \cdot e^{480,94/T} \cdot u^{0,39} \cdot \eta_{\Sigma}^{0,13} \quad (5)$$

В приведенных зависимостях суммарная истинная деформация определяется по формуле $\eta_{\Sigma} = \ln(H_0 / H_i)$. Средняя величина расхождения с экспериментальными данными для композиции сталей 08кп и У8 составила 8,9%; для композиции сталей 08Х18Н10 и У8 - 9,7%.

Результаты физико-механических испытаний полученных многослойных стальных материалов представлены в Таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Сравнение механических свойств многослойной композиции 08кп+У8 при различных температурах прокатки

Материал	Состояние	Толщина слоя, мкм	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
			МПа		%	
08кп+У8	горячекатаная $T_{пр}=800^{\circ}\text{С}$	20	679	834	8,54	21,31
08кп+У8	горячекатаная $T_{пр}=900^{\circ}\text{С}$	20	480	651	8,96	40,07
08кп+У8	горячекатаная $T_{пр}=1000^{\circ}\text{С}$	20	439	618	10,94	28,36
08кп+У8	горячекатаная $T_{пр}=1100^{\circ}\text{С}$	20	218	439,53	10	19,39
08кп+У8 2ой передел	горячекатаная $T_{пр}=1100^{\circ}\text{С}$	0,3	492	688,2	5,63	7,17
У8	горячекатаная $T_{пр}=1100^{\circ}\text{С}$	–	529,3	777,57	5	14,08
08кп	нормализов. ГОСТ 1577-93	–	175	290	35	60

Приведены результаты испытаний композиции сталей У8+08Х18Н10 и исходных материалов, составляющих слоистую композицию (Рисунок 12). Для разрушения слоистых образцов требуется энергии в 2,4 раза больше, чем для разрушения монолитных образцов стали 08Х18Н10.

Таблица 2.

Механические свойства композиции сталей У8+08Х18Н10 и исходных материалов после горячей прокатки

Материал	$E \cdot 10^3$	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
	МПа			%	
У8	209	529	778	5	14,08
08Х18Н10	200	294	703	39,0	49,0
У8+08Х18Н10	150	560	960	7,3	44,1
У8+08Х18Н10 (после 2-го цикла)	177	880	1470	4,0	18,1

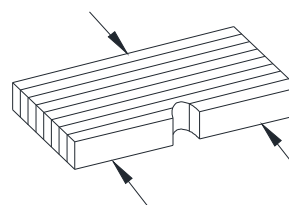
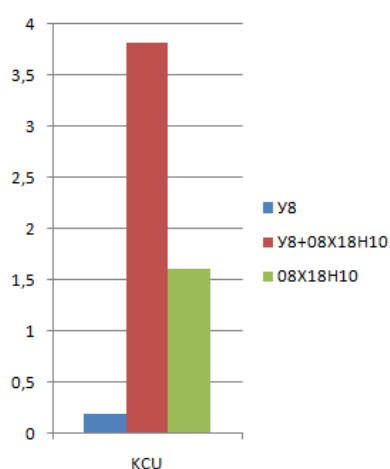
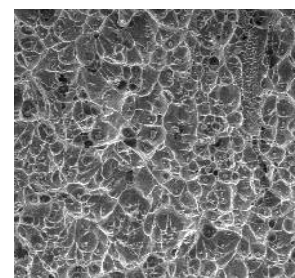
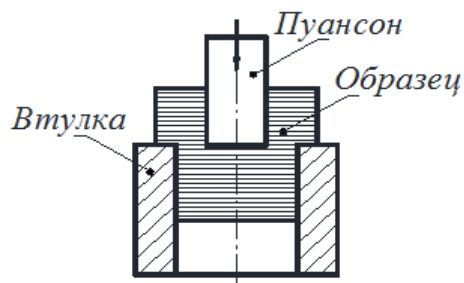


Рисунок 12. Сравнение ударной вязкости многослойной композиции сталей У8+08Х18Н10 после 2-го цикла (толщина слоя 3,2 мкм) с исходными материалами

Для проведения испытаний на отрыв слоев изготавливались ступенчатые образцы $\varnothing 40$ мм, вырезанные из проката при помощи электроэрозии и обработанные на токарном станке, таким образом, чтобы полученная ступенька была параллельна расположению слоёв (Рисунок 13).



а)

б)

в)

Рисунок 13. Испытание многослойных образцов на отрыв

а) схема нагружения многослойных образцов;

б) вид образцов после испытания;

в) фотография излома, увеличение $\times 2750$

Результаты испытаний на отрыв приведены на Рисунке 14.

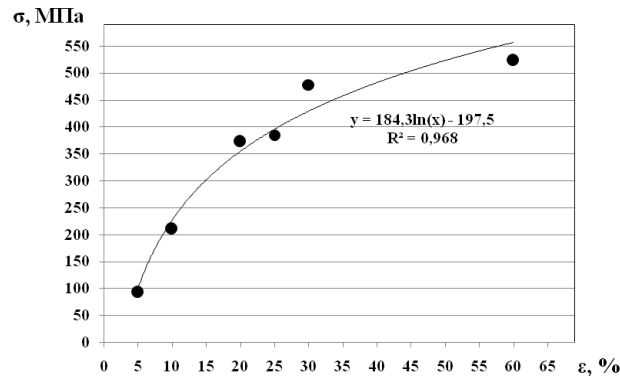


Рисунок 14. Зависимость напряжения отрыва от величины относительной деформации при прокатке

При суммарной относительной степени деформации равной 60% величина прочности соединения равна 520МПа, что соответствует пределу прочности стали 08Х18Н10 в закалённом состоянии (ГОСТ 5582-75).

В четвертой главе изложены рекомендации для промышленного освоения технологии малотоннажного производства многослойных нанокристаллических материалов. Описан алгоритм выбора режимов деформации и расчета основных параметров технологии прокатки многослойных стальных материалов: числа слоев в конечной заготовке, числа циклов сборки и прокатки многослойного пакета, размеров заготовки, числа проходов прокатки.

Приведена экономическая оценка разработанного процесса. Показано, что при производительности 10 т/ мес., стоимость многослойного листа в два раза выше стоимости исходных материалов.

Основные выводы

Экспериментальными исследованиями установлено:

1. По сравнению со сталью У8 для исследованных композиций в зависимости от деформационных режимов при температуре прокатки в интервале 800-1100°C наблюдается увеличение предела текучести от 6 % до 65% и предела прочности от 7% до 90%; понижение модуля упругости от 15% до 28%; величина ударной вязкости возрастает в 2,4 раза по сравнению со сталью 08Х18Н10 и в 19 раз по сравнению со сталью У8.
2. По сравнению со сталью У8 значения сил прокатки для исследованных композиций возрастают от 15% до 150%.

Функция упрочнения для композиции сталей (08кп+У8) при $T_{пр}=1023\div1373\text{К}$, $u=0,6\div5\text{ с}^{-1}$; $\eta_{\Sigma}=0,1\div3,5$ описывается уравнением:

$$\sigma_{\phi} = 17,39 \cdot e^{1863,62/T} \cdot u^{0,16} \cdot \eta_{\Sigma}^{0,24}$$

Функция упрочнения для композиции сталей (У8+08Х18Н10) при $T_{пр}=873\div1273\text{К}$, $u=0,6\div5\text{ с}^{-1}$; $\eta_{\Sigma}=0,1\div3,5$ описывается уравнением:

$$\sigma_{\phi} = 126,12 \cdot e^{480,94/T} \cdot u^{0,39} \cdot \eta_{\Sigma}^{0,13}$$

3. Установлено, что декремент затухания колебаний в стослойном образце композиции (У8+08Х18Н10) в 3 раза выше по сравнению с монолитным образцом стали 08Х18Н10; декремент затухания образца, имеющего 2500 слоев, до 5 раз превышает декремент для монолитного образца.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Прокатка стального многослойного материала / А.С. Шинкарев [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 8. С. 39-42 (0,4 п.л./0,15 п.л.)
2. Шинкарев А. С., Колесников А. Г. Моделирование прокатки многослойных композитов на основе разнородных металлов // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» ЭЛ № ФС 77 – 30569 государственная регистрация № 0421100025. № 5, май 2011. technomag.bmstu.ru/doc/191739.html (0,3 п.л./0,15 п.л.)
3. Колесников А. Г., Шинкарев А. С. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» ЭЛ № ФС 77 – 30569 государственная регистрация № 0421100025. № 11, ноябрь 2014. <http://technomag.bmstu.ru/doc/738880.html> (0,3 п.л./0,15 п.л.)
4. Колесников А. Г., Плохих А. И., Шинкарев А. С. Измерение сил прокатки супермногослойных стальных материалов и определение зависимости сопротивления деформации от параметров процесса // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» ЭЛ № ФС 77 – 30569 государственная регистрация № 0421100025. № 12, декабрь 2014. <http://technomag.bmstu.ru/doc/739772.html> (0,4 п.л./0,15 п.л.)
5. Миронова М.О., Шинкарев А.С. Исследование особенностей формирования ламинарного строения в многослойных материалах при деформационном воздействии // Будущее машиностроения России: Сборник трудов 4-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ, 2011. С. 164–165. (0,1 п.л./0,07 п.л.)
6. Шинкарев А.С., Миронова М.О. Разработка технологии прокатки многослойных металлических композитов // Сборник тезисов Пятой научно-практической конференции молодых специалистов ОМК. Выкса, 2012. С. 29–31. (0,12 п.л./0,07 п.л.)
7. Шинкарев А.С., Миронова М.О. Исследование методов предварительного компактирования для получения многослойных материалов на основе железа // Будущее машиностроения России: Сборник трудов 5-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ, 2012. С.123-125. (0,12 п.л./0,07 п.л.)
8. Миронова М.О., Шинкарев А.С. Разработка технологии прокатки наноламинатов на основе железа // Будущее машиностроения России: Сбор-

ник трудов 5-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ, 2012. С. 126-128. (0,12 п.л./0,05 п.л.)

9. Колесников А.Г., Шинкарев А.С. Исследование технологических особенностей создания многослойных материалов методом горячей прокатки // Международного научно-практического семинара «Прогрессивные технологии и оборудование обработки давлением»: Тезисы доклада. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 8-10.

10. Шинкарев А.С., Миронова М.О., Колесников А.Г. Разработка технологии прокатки многослойных металлических композитов на основе промышленно выпускаемых сталей // Перспективы развития металлургических технологий: Сборник тезисов IV конференции молодых специалистов - М.: ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2012 г. С. 60-63. (0,3 п.л./0,1 п.л.)

11. Шинкарев А.С., Миронова М.О. Определение сопротивления деформации многослойных стальных материалов // Будущее машиностроения России: Сборник трудов 6-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ, 2013. С.148-149. (0,12 п.л./0,07 п.л.)

12. Миронова М.О., Шинкарев А.С. Выбор метода предварительного компактирования многослойных заготовок под горячую прокатку // Будущее машиностроения России: Сборник трудов 6-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МГТУ, 2013. С. 150-151. (0,1 п.л./0,04 п.л.)