

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 620.186.5 + 620.17



На правах рукописи

Шибakov Ростислав Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ
СТАЛЕЙ С ЗАДАНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКОЙ**

Специальность

05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Набережные Челны – 2016

Работа выполнена на кафедре «Материалов, технологии и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель: **Астащенко Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Материалов, технологии и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Официальные оппоненты: **Зарипов Наиль Гарифьянович**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедения и физики металлов», проректор ФГБОУ ВПО Уфимского государственного, авиационного технического университета

Лутфуллин Рамиль Яватович

доктор технических наук, заведующий лабораторией № 10 «Сверхпластической обработки перспективных материалов» ФГБУН «Институт проблем сверхпластичности металлов» РАН

Ведущая организация: ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н.Туполева

Защита диссертации состоится «25» марта 2016г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.31 при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 423800, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», УЛК-5, ауд 309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направить по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/10, диссертационный совет Д 212.081.31. Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.081.31



к.т.н, доцент
Мавлеев Ильдус Рифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изготовление деталей машин технологическими процессами, основанными на холодной пластической деформации позволяет удачно сочетать высокую производительность с низкой себестоимостью производства, обеспечивать ресурсосбережение и хорошие эксплуатационные свойства получаемых изделий. Холодная объемная штамповка (ХОШ) и ее разновидность холодная высадка (ХВ) успешно применяются при изготовлении деталей из низкоуглеродистых сталей. Однако производство ХВ деталей крепежа повышенной прочности требует применения среднеуглеродистых легированных марок сталей и приводит к производственным проблемам из-за возникающего брака по разрушению и низкой стойкости штамповочного инструмента, что обусловлено недостаточной пластичностью этих сталей и высоким сопротивлением деформации. Наличие этих проблем вызывает необходимость разработки методов более тщательной оценки технологических свойств указанного класса сталей и выработки обоснованных рекомендаций по корректировке маршрутов и режимов подготовки сталей до требуемого уровня улучшения структуры и технологических свойств. Полное использование ресурса свойств сталей – актуальная, научно-значимая задача создания интенсивных, ресурсосберегающих технологий производства деталей машин повышенной эксплуатационной надежности.

Цель работы: Формирование в среднеуглеродистых, малолегированных сталях тепловой и деформационной обработкой заданного комплекса технологических и эксплуатационных свойств для производства крепежных изделий повышенной прочности на основе совершенствования методики оценки их пригодности к холодной высадке.

Задачи исследования, поставленные в работе:

- Выявить основные факторы: физико-механические свойства, параметры макро- и микроструктуры в сталях для холодной высадки деталей крепежа регламентирующие требуемый уровень технологических свойств для бездефектного изготовления деталей с экономически целесообразной стойкостью штампового инструмента, а также заданный комплекс эксплуатационных свойств деталей;
- Разработать методику прогнозирования разрушения сталей, основанную на оценке уровня накопленной при пластической деформации поврежденности для различных технологических процессов холодной высадки;
- Разработать методику определения пригодности сталей на основе прогнозирования их упрочнения и разрушения в конкретных условиях изготовления деталей холодной высадкой;
- Исследовать влияние технологических маршрутов и их термомеханических параметров, на микроструктуру, технологические и эксплуатационные свойства сталей для производства деталей крепежа повышенной прочности;

- Провести апробацию полученных результатов в производственных условиях изготовления крепежа повышенной прочности

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Обосновано, что наиболее полно технологические свойства сталей характеризуются совокупностью диаграмм пластичности и упрочнения представляющих зависимости накопленной до разрушения степени деформации от показателя схемы напряженного состояния при испытании и деформационного наклепа от степени деформации. Сопоставление этих зависимостей штампуемого металла с эволюцией аналогичных параметров в деформируемой заготовке позволяет оценить величину и распределение поврежденности металла и деформационного наклепа, а соответственно, определить пригодность данного материала для конкретных условий изготовления деталей холодной высадкой;

2. На основе гипотезы суммирования повреждений и линейного закона их накопления при холодной пластической деформации разработана методика оценки поврежденности ψ , учитывающая пластические свойства стали, путь ее деформирования, стохастичность изменения этих параметров, позволяющая определять предельно допустимую степень деформации при изготовлении деталей холодной высадкой;

3. Показано, что приемлемым для восстановления прочностных и пластических свойств холоднодеформированных сталей после рекристаллизационного отжига является диапазон поврежденности $0,15 < \psi < 0,7$: при $\psi > 0,7$ наблюдается интенсивное падение значений этих свойств коррелирующее с аналогичным изменением плотности образцов вследствие образования при холодной деформации пористости не устраняемой отжигом; при $0,07 < \psi < 0,15$ снижение этих свойств обусловлено аномальным ростом зерна (при критической деформации);

4. Разработана методика определения пригодности сталей, основанная на оценке поврежденности и технологического наклепа, позволяющая обоснованно выбирать марки сталей, использование которых обеспечивает требуемый уровень технологических и эксплуатационных свойств при конкретных условиях изготовления и эксплуатации деталей получаемых холодной высадкой;

5. Комплексно исследовано влияние деформационных и температурно-временных параметров маршрутов производства проволоки для холодной высадки деталей крепежа повышенной прочности. Разработаны регрессионные модели связи режимов прокатки, холодной калибровки и сфероидизирующего отжига с комплексом прочностных и пластических свойств стали, установлено, что наиболее значимое влияние на свойства оказывают температура конца горячей прокатки, суммарная деформация при холодной калибровке, температура и время сфероидизирующего отжига.

Практическая ценность диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны рекомендации по режимам подготовки среднеуглеродистых малолегированных сталей для изготовления холодной высадкой деталей крепежа повышенной прочности, обеспечивающие повышение пластических свойств и снижение нагрузок на штамповый инструмент;

2. Предложен способ оценки пригодности стали к холодному деформированию (получен патент на изобретение RU №2568887) о выдаче патента на изобретение).

3. Предложен метод и устройство для определения предельных деформаций при сжатии высоких образцов с $h_0/d_0 > 2$ (получен патент на изобретение RU №2183528);

4. На основании расчетов по разработанным методикам выбраны стали и спроектирован безотходный технологический процесс холодного поперечного выдавливания кольцевых деталей (получен патент на изобретение RU №2163853), а также разработан технологический процесс холодной высадки высокопрочных болтов (класс прочности 8.8 и более) с технологическим деформационным упрочнением без применения заключительной термообработки.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается использованием современного и поверенного лабораторного оборудования, стандартных методов контроля тепловых и деформационных параметров, структуры и свойств сплавов, повторяемостью результатов, согласованностью теоретических и экспериментальных данных, применением современных статистических методов обработки экспериментальных данных, положительными результатами использования полученных данных в технологических процессах холодной высадки.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, организации и проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе и обобщении результатов исследований, опытно-промышленной апробации, сопоставлении полученных результатов с данными информационных источников, формулировании выводов, подготовке к публикации заявок на изобретения и научных статей.

Реализация результатов работы. Рекомендации по совершенствованию режимов термомеханической подготовки сталей к холодной высадке используются в производстве деталей крепежа на предприятиях ОАО «КАМАЗ» и ООО «Сатурн». Методики прогнозирования разрушения и выбора марок сталей используются при проектировании новых и совершенствовании действующих технологических процессов холодной высадки на этих же предприятиях, а также в учебном процессе в Набережночелнинском институте К(П)ФУ при курсовом и дипломном проектировании и изучение дисциплин «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов»

Апробация работы. Основное содержание работы опубликовано в рецензируемых журналах, сборниках трудов, изобретениях, обсуждалось на

международных научно-технических конференциях «Образование и наука производству (г. Набережные Челны 2010 г.)», Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «III Камские чтения» (г. Набережные Челны, 2011 г.), «Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии и материалы – 2013 (МНТК «ИМТОМ» - 2013, 2014, 2015 г. Казань)», Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ 15), Санкт-Петербург. – 23-27 июня 2015».

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, из них 8 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в Scopus, 7 тезисов докладов, получены 3 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников, включающих 164 наименования, приложения. Диссертация изложена на 142 страницах, содержит 38 рисунков, и содержит 14 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследования, сформирована цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость, реализация и апробация работы.

В первой главе приведен аналитический обзор различных информационных источников, включая интернет-ресурсы и патентные исследования по теме диссертации. Основными предпосылками для выполнения исследований послужили работы по влиянию маршрутов, режимов теплового и деформационного воздействия на структуру, технологические и эксплуатационные свойства стали, а также работы по оценке уровня использования ресурса свойств металла в конкретных технологических процессах, проведенные отечественными и зарубежными учеными: Садовским В.Я, Гуляевым А.П, Никитиным В.И, Рубцовым М.Н, Рахштаттом А.Г, Меськиным В.Г, Еланским Г.Н, Евойским В.И, Новиковым И.И, Шавриным О.И, Дальским А.М, Глинером Р.Е, Суловым А.Г, Скудновым В.А, Кальнером В.Д, Тихоновым А.К, Колмогоровым В.Н, Богатовым А.А, Бриджменом П, Кобаяши Ш, Шабейк А и др. В этой главе рассмотрены также вопросы по выбору сталей для формообразования деталей холодной пластической деформацией, методам исследования пластических свойств, закономерностям и критериям разрушения сплавов при пластической деформации, связи структуры сплавов с комплексом технологических и эксплуатационных свойств, технологическим методам управления структурообразованием в сплавах. Выделены проблемы, исходя из которых обозначена цель и задачи исследования. Показано, что дальнейшее совершенствование методов оценки ресурса свойств стали, особенности его формирования и использования при производстве деталей машин заданного качества, является перспективным направлением исследований, открывающим

путь к более полному использованию технологических и эксплуатационных свойств стали.

Во второй главе приведены сведения об использованных в работе материалах, методах исследования и испытательном оборудовании. Исследования проводились на применяемых для производства деталей крепежа повышенной прочности сталях 35 селект, 12ХГНМТА, 38ХГНМ, 40ХН2МА. Химический состав сталей определялся методом спектроскопии с использованием микрофотометра МФС-51 и спектрофотометра АФС-51 со специализированным ПО SBPи Next и приборов АН-7229 и АН-7560 для определения углерода и серы. Механические свойства определялись на испытательной машине с гидроприводом ZD-100 при испытании стандартных образцов на растяжение (ГОСТ 1497-84). Пластичность стали при значениях показателя схемы напряженного состояния (K) $3 > K = \sigma / \sigma_i > 1$ (σ, σ_i – среднее напряжение и интенсивность напряжений в данном испытании) определялась на специально спроектированном образце содержащем несколько рабочих частей с выточками разного диаметра, что позволяло получить за одно испытание 4÷6 значений пластичности для различных K .

Определение пластичности сталей для значений $-1 < K < 1$ проводилось при испытании образцов в специальном устройстве, где при изменении условий трения образцы доводили сжатием до разрушения. Высокие образцы во избежание потери устойчивости при сжатии испытывались в устройстве для поперечного выдавливания (устройство защищено патентом на изобретение RU №2183528).

По результатам испытаний строились диаграммы пластичности (ДП) отображающие ее изменение в зависимости от значений показателя K . За меру пластичности принята степень деформации Λ_p накопленная к моменту разрушения образца в месте его разрушения

Испытание сжатием проводилось ступенями вплоть до разрушения. Параметры искаженной деформацией сетки, нанесенной в экваториальном сечении боковой поверхности измерялись на инструментальном микроскопе с точностью $\pm 0,01$ мм. Измерения сглаживались методом наименьших квадратов после чего рассчитывались компоненты тензора деформации T_ε и тензора скоростей деформации $T_{\dot{\varepsilon}}$. Значения K определяли по зависимостям теории течения и деформационной теории. Для определения путей деформирования $K=K(\Lambda)$ в исследуемых процессах высадки деталей крепежа и при поперечном выдавливании использовалась аналогичная вышеприведённой методика.

Выявление очага деформации при ХВ и зон максимальной деформации, где наибольшая вероятность разрушения производилась измерением твердости деталей разрезанных по меридиональному сечению. Макроструктура изучалась на протравленных темплатах в соответствии с ГОСТ 10243-75. Микроструктуру деталей и образцов исследовали с помощью оптического микроскопа Neophot-2. Определение плотности образцов после деформации проводилось гидростатическим методом, взвешиванием в толуоле.

В третьей главе исследованы закономерности разрушения сталей при холодной пластической деформации. В исходном состоянии сталь обладает ресурсом пластичности, который по мере роста деформации уменьшается. Мерой пластичности является степень деформации Λ_p , накопленная в момент разрушения. На рис. 1 схематично представлены значения Λ_{pi} при испытании на сжатие $\Lambda_{pc}(K_c=-1)$, кручение $\Lambda_{pk}(K=0)$, растяжение $\Lambda_{pp}(K=1)$. Увеличение Λ_p по мере возрастания доли сжимающих напряжений в испытании - общая закономерность для большинства металлов и сплавов. Линия 1 соединяющая значения Λ_{pi} при различных значениях $K=const$ является диаграммой пластичности $\Lambda_p=\Lambda_p(K)$.

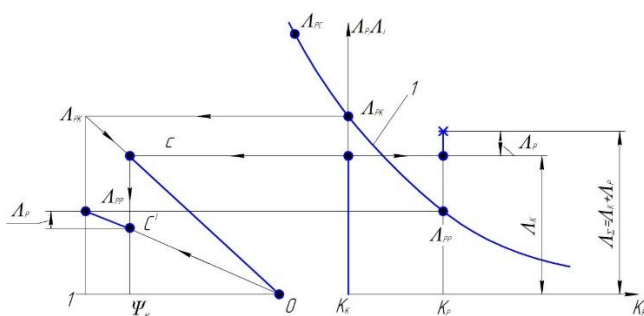


Рис. 1

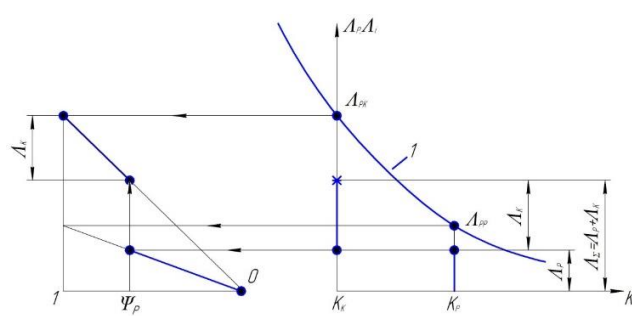


Рис. 2

Современное представление о механизме разрушения при пластической деформации основано на экспериментально установленном факте поврежденности материала проявляющейся в зарождении, развитии и слиянии пор по мере роста деформации. Закономерность накопления повреждений при линейном законе на рис. 1 представлена линией $O\Lambda_{pk}$ для случая деформирования образца кручением $K=0=const$. Поврежденность ψ накапливается при кручении образца до степени деформации Λ_k по отрезку OC , ее значение ψ_k из подобия треугольников $\Delta(O\Lambda_{pk}1)$, $\Delta(OC\psi_{pk})$, равно $\psi_k = \Lambda_k / \Lambda_{pk}$. При дальнейшем деформировании растяжением ($K=1=const$), поврежденность будет накапливаться по линии $O\Lambda_{pp}$. Остаточная пластичность Λ_p определяется согласно схеме на рис. 1. Итоговая деформация $\Lambda_\Sigma = \Lambda_k + \Lambda_p > \Lambda_{pp}$ больше Λ_{pp} на величину $\Delta\Lambda$.

Аналогичным образом (рис. 2) определялась накопленная поврежденность ψ_p , суммарная пластическая деформация до разрушения Λ_Σ и $\Delta\Lambda_k$ при другом пути деформирования (в начале растяжение на Λ_p и последующее деформирование кручением до разрушения).

На рис. 3 представлена схема прогнозирования момента разрушения (определение $\Lambda_{p\Sigma}$) разработанная для более сложного случая, когда путь деформирования задан некоторой произвольной функцией. Если эту функцию заменить ее дискретным аналогом, т.е. последовательностью деформирований

$\Delta\Lambda_1 + \Delta\Lambda_2 + \dots + \Delta\Lambda_n$ при соответствующих им значениях $K_1, K_2, \dots, K_n = \text{const}$, то определение итоговой степени деформации, при которой происходит разрушение, можно свести к ранее рассмотренному алгоритму.

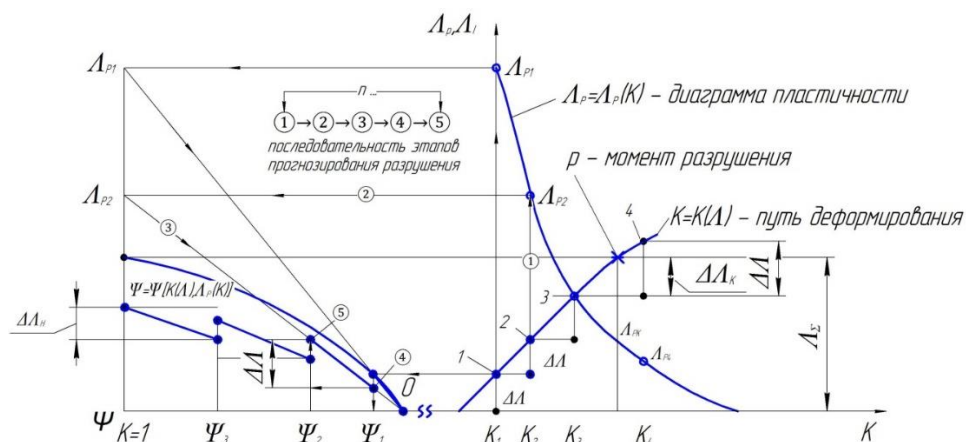


Рис. 3

Циклически реализуя последовательность $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{5}$ (отмечены \rightarrow на рис. 3), определяем итоговую разрушающую степень деформации Λ_Σ , которая согласно рассмотренному алгоритму может быть рассчитана исходя из следующих соотношений (1) и (2):

$$\sum_{i=1}^n \psi_i = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda_{p1}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda_{p2}} + \dots + \frac{\Delta\Lambda_n}{\Lambda_{pn}} = 1, \quad (1)$$

Соотношение (1) при переходе к бесконечно малым приращениям $d\Lambda$ примет вид

$$\int_0^{\Lambda_\Sigma} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p(\Lambda)} = 1, \quad (2)$$

Разработанная методика учитывает влияние пути деформирования $K=K(\Lambda)$ и диаграмм пластичности материала на предельную степень деформации допустимую при холодном пластическом формообразовании в конкретном технологическом процессе и позволяет регламентировать требования к технологическим свойствам применяемых для ХВ сталей.

На сталях 35 селект и 40ХН2МА при испытаниях по схеме деформирование кручением образцов до различных значений ψ_K с последующим растяжением до разрушения, исследовано влияние уровня поврежденности сталей при холодной деформации на восстановление отжигом механических свойств σ_b , δ , ψ . Установлено, что в области значений поврежденности $0,05 < \psi < 0,2$ наблюдается уменьшение пластичности и прочности ниже уровня значений этих характеристик до деформации, что связано с аномальным ростом (в 3, 4 раза) величины зерна при рекристаллизации после критической деформации. Далее при $0,2 < \psi < 0,7$ наблюдается рост свойств при максимуме значений $\psi \approx 0,5$, что также связано с

размером зерна, которое интенсивно уменьшается при рекристаллизации в этом диапазоне ψ . При $\psi > 0,7$ происходит падение уровня определяемых свойств вследствие концентрации и слияния микропор в зоне локализации деформации. Анализ распределения пор в сечении образца и их изменение при отжиге, а также уменьшение плотности материала образца свидетельствует о неполном «залечивании» такого рода дефектов, после холодной деформации до $\psi > 0,7$.

Исходя из полученных результатов разработана методика определения пригодной для ХВ стали с учетом ее технологических свойств, проявляемых в конкретных условиях изготовления деталей и обеспечивающих бездефектное формообразование, а также высокий уровень эксплуатационных свойств с использованием деформационного наклепа. Блок-схема алгоритма реализации методики приведена на рис.4.

В четвертой главе исследована синергетика влияния маршрутов, а также режимов теплового и деформационного воздействия на структуру и комплекс физико-механических свойств сталей. С использованием системного подхода проведена классификация укрупненных технологических маршрутов (УТМ) и совмещенных с ними способов термического и термомеханического формирования структуры и свойств сталей в процессе их технологического передела (таблица 1). На основе обобщения данных проанализированы возможности и выработаны рекомендации целенаправленного улучшения технологических свойств сталей и эксплуатационных свойств, произведенных из них деталей. Установлено, что снижение на этапе ① при выплавке стали содержание серы и фосфора до 0,02% каждого, сопутствующих хрома, никеля, меди в сумме до 0,2% кремния на нижнем уровне позволяет у стали 35 селективно после сфероидизирующего отжига подката снизить σ_{02} в среднем на 50 МПа и повысить показатели пластичности (δ , ψ) на 6-10 %. Аналогичное влияние оказывает легирование бором.

На этапе ③ при производстве горячей прокаткой подката, снижение температуры конца прокатки на 30-50 °С до 980-1000°С и ускорение охлаждения после чистой клеши прокатного стана, приводит к получению более однородной структуры с зерном 6-9 баллов ГОСТ 8233-56, при этом снижается степень развития «видманштеттовой» структуры. Холодная деформация при калибровке проката на этапе ④ ускоряет сфероидизацию карбидов, способствует формированию однородной структуры с глобулярными карбидами при отжиге.

С целью обобщения данных по влиянию режимов подготовки стали к ХВ на основе планирования многофакторных экспериментов получены регрессионные модели связи, свойств с параметрами технологических процессов. Оценка распределения величин σ_{02} , δ , НВ показала, что их статистические совокупности, в основном соответствуют нормальному закону, а зависимости свойств от параметров адекватно описываются линейными функциями:

$$\sigma_{02}[\text{Мпа}] = 315,65 - 0,42d + 0,09T_{\text{H}} - 0,271T_{\text{к.пр}} + 0,16T_{\text{сМ}} - 4,01\tau_{\text{H}} + 5,04\tau_{\text{В}} + 0,78\tau_{\text{О}};$$

$$\sigma_B[\text{МПа}] = 550,16 - 1,79d + 0,64\varepsilon + 0,072T_H - 0,2T_{\text{к.пр}} + 0,19T_{\text{см}} - 3,7\tau_H + 2,12\tau_B + 0,76\tau_O;$$

$$\delta[\%] = 37,452 + 0,392d - 0,098\varepsilon - 0,0072T_H - 0,0032T_{\text{к.пр}} - 0,018T_{\text{см}} + 0,74\tau_H + 0,342\tau_B - 0,118\tau_O;$$

$$\text{HRB} = 38,216 - 0,25d + 0,068\varepsilon + 0,014T_H - 0,025T_{\text{к.пр}} + 0,034T_{\text{см}} - 0,534\tau_H - 0,496\tau_B + 0,278\tau_O;$$

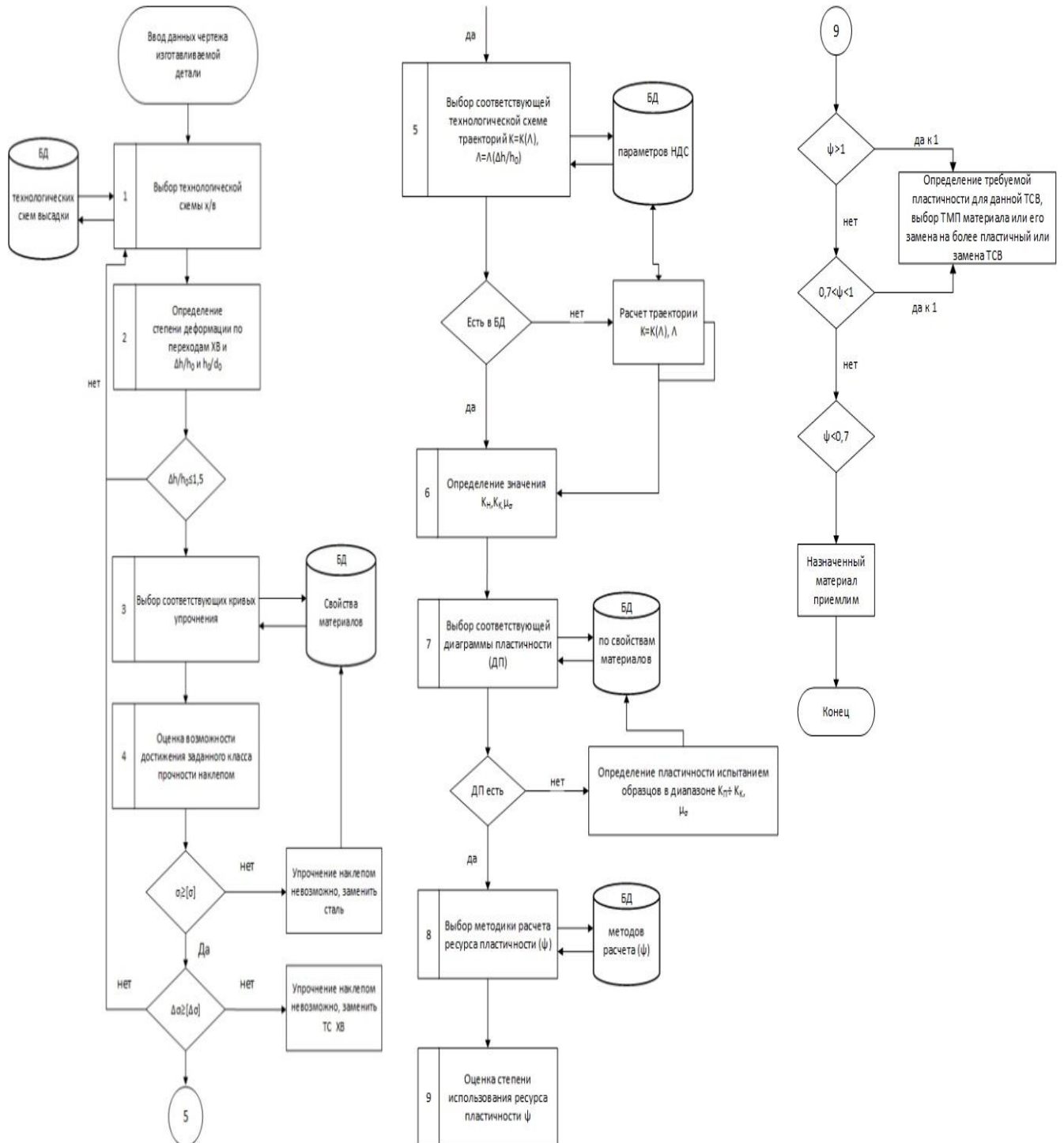
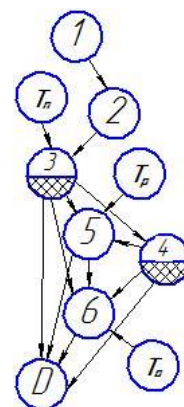


Рис. 4. Блок-схема алгоритма методики оценки пригодности стали для XB с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами

Классификация укрупненных технологических маршрутов (УТМ) производства и потребления сталей и способов улучшения их свойств

Этапы обработки металла						Классификатор УТМ	Обобщенный оргграф G (Ф, Е) УТС
Плавка металла	Формообразование					Тип УТМ	Вид УТМ
	Кристаллизацией	Прокаткой	Штамповкой	Черновой механо-об.	Чистовой механо-об.		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
1	1	0	0	0	0	I	А
1	1	1	0	0	0	II	
1	1	0	1	0	0	III	
1	1	1	1	0	0	IV	
1	1	0	0	0	1	I	А
1	1	1	0	0	1	II	
1	1	0	1	0	1	III	
1	1	1	1	0	1	IV	
1	1	0	0	1	0	I	Б
1	1	1	0	1	0	II	
1	1	0	1	1	0	III	
1	1	1	1	1	0	IV	
1	1	0	0	1	1	I	Б
1	1	1	0	1	1	II	
1	1	0	1	1	1	III	
1	1	1	1	1	1	IV	
Способы улучшения свойств сталей							
Очистка от вредных примесей, легирование	Подавление ликвации, формирование однородной микро-структуры	Формирование рационального макро и микростроения, термомеханическое упрочнение	На свойства сталей не влияют, кроме процессов СППД, или ухудшают при нарушении макроструктуры	1 – обработка есть, 0 – нет Т _п , Т _р , Т _о – термообработки: подготовки к ХВ, к обработке резанием, окончательная ⊗ - совмещенное с пластическим формообразованием упрочнение D – готовая деталь			



Результаты оценки вкладов, вносимых параметрами технологии в дисперсии свойств показывают, что они существенно влияют на свойства стали для ХОШ, при этом наиболее значимое воздействие оказывают температура конца горячей прокатки, степень обжата при холодной калибровке, время и температура сфероидизирующего отжига.

Изменение технологических свойств стали хорошо коррелирует с морфологией структурных составляющих. На рис. 5 приведены диаграммы пластичности стали обработанной по различным маршрутам и режимам в результате реализации которых формируется различная микроструктура. Показано, что более высокие показатели пластичности Λ при $K=1$ (растяжение) присущи стали содержащей в структуре 100% P_3 – зернистого перлита, с размером зерна феррита 0,014-0,024 мм. Пластичность стали после горячей прокатки со структурой 100% P_{II} – пластинчатого перлита и размером зерна 0,05-0,065 мм ниже $\Lambda_{P_3}/\Lambda_{P_{II}} = 2.1$. Пластичность стали с разными соотношениями в структуре P_3/P_{II} 70/30, 50/50, 30/70 % возрастает по мере увеличения доли P_3 в структуре. С уменьшением значений K (возрастание уровня сжимающих напряжений в образцах при испытаниях) пластичность сталей со всеми структурными состояниями монотонно растет, но отношение $\Lambda_{P_3}/\Lambda_{P_{II}}$ уменьшается. При $K=-1$ (сжатие) оно составляет уже $\Lambda_{P_3}/\Lambda_{P_{II}} = 1,3$, что свидетельствует о снижении чувствительности пластичности стали к структурному состоянию по мере уменьшения K .

Результаты исследования использованы применительно к технологическому процессу холодной высадки болтов повышенной прочности (класс прочности 8.8 и выше).

Данные по степеням деформации на переходах высадки различных элементов болта и уровни их деформационного упрочнения с учетом знака наибольшей деформации элемента для анализируемых вариантов технологии сведены в таблице 2.

Окончательное заключение о предпочтительности того или иного варианта может быть обоснованным после оценки уровня исчерпания пластичности при холодной высадке головной части болта, где в производственных условиях наиболее часто происходит разрушение металла.

Результаты расчета поврежденности Ψ для сравниваемых вариантов представлены на рис. 4 где 1, 2 – пути деформирования $K=K(\Lambda)$ для зоны вероятного разрушения на боковой поверхности высаживаемой части (головки) болта, соответственно для вариантов технологических схем III, IV кривые 3, 4 диаграммы пластичности $\Lambda_p=\Lambda_p(K)$ стали 40ХН2МА после разупрочняющего сфероидизирующего отжига по различным режимам на зернистый перлит.

Анализ деформационного упрочнения в процессе холодной высадки деталей типа болт.

Переход холодной высадки	ТСВ			
	Варианты			
	I	II	III	IV
Отрезка заготовок	+	+	+	+
Редуцирование стержневой части (степень деформации, %)	-	28	29	-
Вторичное редуцирование стержневой части (степень деформации, %)	-	-	18	-
Выдавливание стержневой части (степень деформации, %)	-	-	-	56
Высадка конусного перехода	+	+	+	-
Промежуточный отжиг	+	-	-	-
Высадка головки (итоговая степень деформации ε_r , %)	69,3	61,5	51,5	34
Формообразование стержневой части, (итоговая деформация, ε_c , %)	0	28	47	56
Деформационное упрочнение стержня болта стали, σ_i , МПа 40ХН2МА		960	1000	1020
Сталь 06ХГР		950	1020	1040
Разница в уровне деформационного упрочнения головной и стержневой частей, $\Delta\sigma_i$, МПа	300	150	36	42

+ переход выполняется, - переход не выполняется

Расчеты Ψ показали, что сталь со структурой $\Pi_3/\Pi_n = 70/30\%$ для рассматриваемых вариантов не выдерживает без разрушения $\Psi_{III,IV}=1$ требуемой для головной части степени высадки равной $(\Delta h/h_0)_{III}=1,8$, $(\Delta h/h_0)_{IV}=1,46$ соответственно.

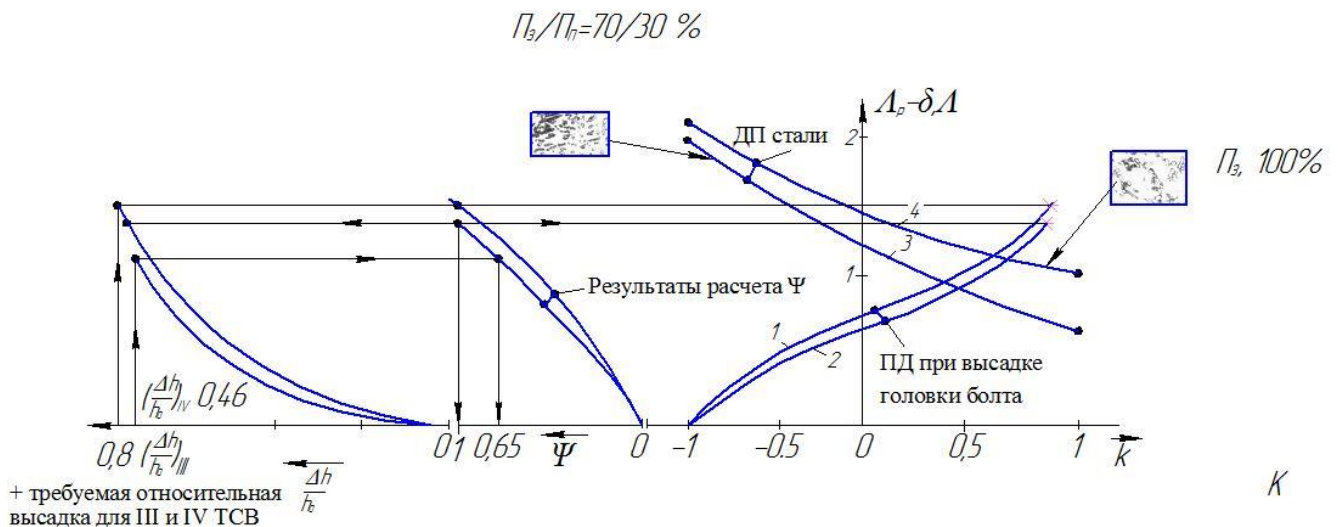


Рис 5. Оценка пригодности стали 40ХН2МА для холодной высадки болта М8 по технологическим схемам III, IV.

Сталь содержащая 100% P_3 пригодна для холодной высадки болта по IV варианту $0,7 > \Psi \approx 0,65$ и непригодна для высадки болта по варианту III так-как $\Psi = 1$, что подтверждается опытной штамповкой.

Таким образом результаты исследований технологических свойств среднеуглеродистых малолегированных сталей после различных маршрутов и режимов деформационной и тепловой обработки показывают, что при обеспечении структурного состояния с присутствием 100% зернистого перлита, они пригодны для получения холодной высадкой деталей крепежа повышенной прочности (класс 8.8 и выше) достигаемой за счет деформационного технологического наклепа без применения заключительной упрочняющей термообработки. По этой же методике был исследован и спроектирован технологический процесс поперечного выдавливания и выбран материал для изготовления безотходным методом кольцевых заготовок (шайб) Патент на изобретение RU № 2163853)

Основные результаты и выводы.

1. Разработана методика расчета ψ основанная на гипотезах линейного накопления повреждений и их суммирования, учитывающая исходные пластические свойства сталей, представленные диаграммой пластичности, а также путь деформирования в зонах вероятного разрушения металла заготовки для типовых переходов ХВ деталей крепежа.

2. Построены ДП для стали 35 селект, с различными структурными состояниями. Показано, что более высокие показатели пластичности Λ_p при $K=1$ (растяжение) присущи стали содержащей в структуре 100% P_3 – зернистого перлита с размером цементитных глобулей, 0,5-1,0 мкм и размерам зерна феррита 0,01-0,014 мм. Пластичность стали после горячей прокатки со структурой 100% P_{II} – пластинчатого перлита и размером зерна 0,03-0,04 мм существенно ниже при этом $\Lambda_{P_3}/\Lambda_{P_{II}} = 2.1$. Пластичность стали с разными соотношениями в структуре P_3/P_{II} 70/30, 50/50, 30/70 % возрастает по мере увеличения доли P_3 в структуре. С уменьшением значений K (возрастание уровня сжимающих напряжений в образцах при испытаниях) пластичность сталей со всеми структурными состояниями монотонно растет, но отношение $\Lambda_{P_3}/\Lambda_{P_{II}}$ уменьшается. При $K=-1$ (сжатие) $\Lambda_{P_3}/\Lambda_{P_{II}} = 1,3$, что свидетельствует о снижении чувствительности пластичности стали к структурному состоянию по мере уменьшения K .

3. Исследовано на сталях 35 селект, 40ХН2МА влияния параметра Ψ накопленного при холодной пластической деформации на изменение комплекса механических свойств стали (σ_{02} , σ_b , δ , ψ) – пределы текучести и прочности, относительное удлинение, сужение, после рекристаллизационного отжига. Установлено, что в интервале значений $\Psi = (0,07 - 0,15)$, соответствующих диапазону критических деформаций $\epsilon_{кр}$, значения свойств снижаются относительно исходного состояния в среднем на 10-20% из-за аномального роста зерна $pr\epsilon = \epsilon_{кр}$. В диапазоне $\Psi = (0,15-0,7)$ они растут достигая максимума при $\Psi \approx 0,5$, а при $\Psi > 0,7$ резко падают. Это связано с образованием в зоне разрушения

образца пор критического размера не «залечиваемых» диффузионными процессами массопереноса, происходящими при отжиге. Соответственно рациональный интервал использования ресурса пластичности сталей при формообразовании деталей ХВ составляет $0,2 < \Psi < 0,7$.

4. Предложена методика научно-обоснованного определения пригодности сталей для бездефектной (без разрушения) ХВ деталей с улучшенными эксплуатационными свойствами и алгоритм ее реализации, которые опирались на разработанную методику прогнозирования повреждаемости Ψ стали для путей деформирования, характеризующих конкретные условия ХВ деталей и зависимость комплекса физико-механических свойств сталей после отжига от накопленного при холодной деформации уровня Ψ .

5. Исследовано влияние маршрутов и режимов производства и подготовки стали для ХВ на технологические свойства. Выявлены параметры управления целенаправленное воздействие на которые, позволяет улучшать структуру и повышать технологические свойства сталей. Реализация теплового и деформационного воздействия на различных этапах технологического передела стали позволило обеспечить прирост пластичности на 40-60 процентов и разупрочнить сталь на 20-25%, что благотворно сказалось на стойкости инструмента для ХВ и обеспечило бездефектное производство деталей крепежа повышенной прочности.

6. Получены регрессионные модели устанавливающие влияние маршрутов и режимов подготовки стали к ХВ на комплекс ее прочностных и пластических свойств. Установлено, что наиболее значимое влияние оказывает температура конца прокатки степень обжатия подката при холодной калибровке волочением, температура и продолжительность сфероидизирующего отжига.

7. На основании расчетов поврежденности и деформационного наклепа сталей по разработанным методикам спроектирован безотходный технологический процесс холодного поперечного выдавливания кольцевых деталей (получен патент на изобретение №2163853), разработан технологический процесс холодной высадки высокопрочных болтов (класс прочности 8.8 и более) с технологическим деформационным упрочнением без применения заключительной термообработки.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Шibaков, Р.В., Методика обоснования выбора марки стали для холодной высадки/ Р.В. Шibaков//Заготовительное производство в машиностроении. – 2014. - № 12. – С. 25-29;
2. Астащенко, В.И. Информационная модель материала для формирования банка данных по технологическим и эксплуатационным свойствам конструкционных сталей/В.И. Астащенко, И.О. Жигулев, Р.В. Шibaков// Вестник ТулГУ. –Тула: - 2013. – вып. 11, ч.2 - С. 130-135;
3. Вильданов, И.З. Формирование конструкторско-технологической документации на ответственные детали, получаемые пластическим деформированием, с учетом их эксплуатационных свойств/ И.З. Вильданов, В.Г. Шibaков, Р.В. Шibaков// Вестник Машиностроения. – Москва. – 2015. - №6. – С.55-59;
4. Шibaков, В.Г. Моделирование влияния интенсивной пластической деформации выдавливанием на пластичность и разрушение сплавов/ В.Г. Шibaков, Р.В. Шibaков// Вестник Казанского технологического университета. - Казань – 2014. – том 17, №14 - С. 435-438;
5. Галимов, Э.Р. Оценка упрочнения металла по тепловыделению при холодной пластической деформации/ Э.Р. Галимов, И.А. Абдуллин, Р.В. Шibaков// Вестник Казанского технологического университета. – Казань. - 2015. - Т.18. - №7. - С 34-36;
6. Шibaков, В.Г. Интенсивное пластическое деформирование/ В.Г. Шibaков, С.Н. Гончаров, Р.В. Шibaков// Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – Москва 2014. -№3.- С.31-33;
7. Шibaков, Р.В. Анализ формоизменения кольцевых образцов в условиях изотропного и анизотропного трения/ А.М. Валиев, Д.Л. Панкратов// Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – Москва. - 2013. -№7.- С.9-12;
8. Жигулев, И.О. Особенности разрушения адгезионных связей на границах элементов неоднородных конструкций, полученных деформированием кристаллизующегося сплава / И.О. Жигулев, Р.В. Шibaков, В.Г. Шibaков// Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – Москва. - 2015. - №5. С. 18–22;
9. Шibaков, В.Г. Система автоматизированного расчета технологических свойств металла в процессах разделительных операций листовой штамповки/ В.Г. Шibaков, Д.Л. Панкратов, А.И. Виноградов, Р.В. Шibaков// Кузнечно-штамповочное оборудование. ОМД. – Москва. – 2015. - №4. – С. 36-41;
10. Ganiev, M.M. Effect of Hot and Cold Severe Deformation by Extrusion on Properties of Lead and Aluminium Alloys/ M.M, Ganiev, V.G. Shibakov, D.L. Pankratov, R.V. Shibakov// Russian Metallurgy (Metally), - 2015. - No 7. – pp. 87-92;
11. Shibakov, V.G. Connection between machines durability during operation and complex of physic-mechanical properties, formed during the production of critical parts/ V.G. Shibakov, D.L. Pankratov, R.V. Shibakov Materials Science and Engineering/ - 2014. - V69. – pp. 1-9;

Научные статьи, материалы докладов, патенты.

12. Астащенко, В.И. Классификация методов технологического передела сплавов и сопутствующих им процессов повышения качества металла/ В.И. Астащенко, И.О. Жигулев, Р.В. Шibaков// Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2014 (МНТК ИМТОМ-2014). - Казань. – 2014. - С 12-15;

13. Шibaков, Р.В. Синергетика формирования технологических и эксплуатационных свойств сталей при технологическом переделе/ Р.В. Шibaков// Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2014 (МНТК ИМТОМ-2014), - Казань. – 2014. - С 174-179;

14. Галимов, Э.Р. Влияние интенсивной пластической деформации выдавливанием на свойства металлических материалов/ Э.Р. Галимов, Р.В. Шibaков// Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2014 (МНТК ИМТОМ-2014), - Казань. – 2014. - С 350-354;

15. Шibaков, Р.В. Повышение прочности крепежных изделий технологическим наклепом/ Р.В. Шibaков// Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2014 (МНТК ИМТОМ-2014), - Казань. – 2014. - С 170-174;

16. Галимов, Э.Р. Определение параметров штампуемости листовых металлов/Э.Р. Галимов, Р.В. Шibaков// Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы, 2014 (МНТК ИМТОМ-2014), - Казань. - 2014. - С 227-230;

17. Андреев, А.П. Повышение прочности крепежных изделий формобразуемых из полуфабрикатов полученных интенсивной пластической деформацией/ А.П. Андреев, Д.Л. Панкратов, В.Г. Шibaков, Р.В. Шibaков// Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии (СММТ 15)». Санкт-Петербург. – 23-27 июня 2015. – том 3. – С. 3-14;

18. Шibaков, В.Г. Безотходная штамповка поковок для изготовления кольцеобразных деталей в машиностроении/ В.Г. Шibaков, С.Н. Гончаров, Р.В. Шibaков// Международная научно-практическая конференция «Автомобиль и техносфера». - Казань. – 2009. - С. 99-101;

19. Патент РФ № 2163853. Способ получения кольцевых деталей и устройство для его осуществления. Гончаров С.Н., Шibaков В.Г., Шibaков Р.В. 2001. Бюл. №7;

20. Патент РФ № 2183528. Штамп для поперечного выдавливания. Гончаров С.Н., Шibaков В.Г., Шibaков Р.В. 2002. Бюл. №17;

21. Патент РФ № 2568887. Определение пригодности сталей для объемного пластического формобразования.