

На правах рукописи



Благовский Олег Валерьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЯХ
ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Заслуженный работник Высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор Киселев Евгений Степанович

Официальные оппоненты:

Асташев Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им А.А. Благонравова» Российской академии наук, ведущий научный сотрудник;

Головкин Валерий Викторович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет», доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2015 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д999.003.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый учебный корпус, ауд. 117 (почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет», адрес сайта www.ulstu.ru.

Автореферат разослан

2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Веткасов Н.И.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время все более широкое распространение в России и мире получают высокоскоростные транспортные средства, в том числе наземные и летательные, детали которых работают при повышенных температурах в условиях знакопеременных нагрузок и агрессивных сред. В качестве материалов для таких деталей используются труднообрабатываемые коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, а также сплавы на основе титана и никеля. Так, доля титановых и жаропрочных сплавов в конструкции авиационных двигателей четвертого поколения на 2006 год составляла порядка 89%.

Особенно остро проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств стоит при изготовлении маложестких деталей из труднообрабатываемых материалов, в которых возникающие из-за теплосиловой напряженности и структурно-фазовых превращений остаточные напряжения любого знака способны вызвать существенные изменения в форме и пространственной ориентации. На практике это выливается в необходимость существенно снижать элементы режима, а в некоторых случаях даже подбирать опытным путем последовательность изготовления. Механическую обработку заготовок деталей, обладающих сложной пространственной формой, чаще всего ведут на современных обрабатывающих центрах, для которых подобные потери производительности недопустимы.

Для создания заданного уровня физико-механических свойств поверхностного слоя (ПС) заготовок, как правило, используют термообработку, в частности, отпуск или старение – для снятия остаточных напряжений, частичную или полную аустенитизацию – для регулирования фазового состава или естественную релаксацию остаточных напряжений.

Уменьшать уровень технологических остаточных напряжений (ТОН) можно как сразу после окончательной обработки заготовки, обычно являющейся наиболее теплонапряженной, так и в ходе всего технологического процесса изготовления детали. Традиционно используемые методы связаны либо с большими временными (естественная релаксация), энергетическими (термическая релаксация) и материальными затратами (экспериментальный подбор элементов режима и последовательности обработки), либо с существенными трудностями при обработке маложестких заготовок (поверхностно-пластическое деформирование). Весьма перспективным является использование для этой цели энергии ультразвукового (УЗ) поля.

Однако до настоящего времени весьма сложным является определение рационального места расположения операции релаксации ТОН в технологическом процессе изготовления деталей. Во многом это связано с необходимостью учета процесса технологического наследования. Последнее оказывает существенное влияние на уровень ТОН в готовых деталях. Отсутствие теории, практических рекомендаций и методик учета наследования затрудняет разработку

оптимальных технологических процессов изготовления деталей из различных материалов, в том числе труднообрабатываемых, с заданными эксплуатационными свойствами. Решение данных проблем позволяет повысить точность обработки, уменьшить длительность технологического цикла и снизить себестоимость изготовления деталей.

Цель работы – повышение эффективности механической обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов путем управления формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний.

В соответствии с поставленной целью, были решены следующие *задачи*:

- 1) Установлены основные причины, препятствующие повышению эффективности изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов;
- 2) Выявлены основные методы обеспечения заданного уровня ТОН и фазового состава при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов;
- 3) Выполнен анализ современных подходов учета и математического описания технологического наследования параметров качества ПС заготовок из труднообрабатываемых материалов;
- 4) Проведены теоретико-экспериментальные исследования процесса формирования ТОН и фазового состава ПС заготовок из труднообрабатываемых материалов с учетом технологического наследования;
- 5) Предложены новые способы обработки заготовок с наложением энергии УЗ поля для направленного формирования ТОН и фазового состава ПС и определена технологическая эффективность их использования;
- 6) Разработаны технологические рекомендации по применению новых способов обработки с наложением УЗ поля для направленного формирования параметров качества ПС деталей из труднообрабатываемых материалов;
- 7) Выполнен расчет ожидаемой экономической эффективности от внедрения результатов теоретико-экспериментальных исследований в действующее производство.

Методы исследований. Реализация цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, теории прочности и упругопластических деформаций, механики поверхностного пластического деформирования, математического моделирования. В экспериментальных исследованиях использовали современные средства автоматизации измерения температурно-силовой напряженности в контактных зонах механической обработки, а также современные методы неразрушающего измерения ТОН и фазового состава материала ПС.

Основные научные положения, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту:

1. Методология, математические модели и зависимости, результаты теоретико-экспериментальных исследований наследования ТОН и фазового состава материала ПС.
2. Результаты теоретико-экспериментальных исследований эффективности новых способов комбинированной обработки точением, шлифованием и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием (УЗТВ) с использованием полосового индентора (патенты РФ на изобретения 2423220, 2464153, 2464154, 2464155, 2495741, 2503532, 2548848, 2558311).
3. Результаты теоретико-экспериментальных исследований эффективности УЗ релаксации остаточных напряжений с использованием индентора, имеющего полосовой контакт с заготовкой.

Практическая ценность и реализация работы. Результаты выполненных исследований позволили:

1. Выявить закономерности формирования ТОН и фазового состава материала ПС деталей из труднообрабатываемых материалов при механической обработке с учетом технологического наследования.
2. Предложить новые эффективные способы формирования заданного уровня ТОН и фазового состава поверхностного слоя с использованием энергии УЗ поля и индентора, имеющего полосовой контакт с обрабатываемой заготовкой.
3. Разработать технологические рекомендации по направленному формированию заданных параметров качества ПС на примере остаточных напряжений и фазового состава.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки магистрантов ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет» и переданы для внедрения на АО «Ульяновский механический завод» и ЗАО «Авиастар-СП». Внедрение на последнем позволит уменьшить норму штучного времени при изготовлении партии тонкостенных деталей из титановых сплавов (на примере стакана из сплава ВТ22) до 70 раз за счет замены операции естественного старения на УЗ релаксацию, что обеспечит экономический эффект от внедрения в мелкосерийном производстве 98 тыс. руб (в ценах на сентябрь 2014 г.).

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на научно-технических конференциях (НТК) ФГБОУ ВПО УлГТУ в 2009-2011 гг. и АО «Ульяновский механический завод» в 2014-2015 гг.; международных НТК «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы», г. Волжский (2009 г.); «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, Украина (2009, 2010, 2012 и 2013 гг.); «Молодая наука XXI века», г. Краматорск, Украина (2010-2011 гг.); «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упроч-

нения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня», г. Санкт-Петербург (2010 г.); «Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечение компьютерных технологий в машиностроении», г. Ульяновск (2011 г.); «trans&MOTAUTO», г. Варна, Болгария (2011 г.); «Машиностроительные технологии и техника автоматизации», г. Ереван, Армения (2012 г.); «Технологическое обеспечение машиностроительных производств», г. Челябинск (2013 г.); «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки», г. Ростов-на-Дону (2013 г.); «Инновации в машиностроении – основа технологического развития России», г. Барнаул (2014 г.); «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении», г. Санкт-Петербург (2014 г.).

По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, в том числе 5 в изданиях перечня ВАК и 10 в зарубежных изданиях. Получено 8 патентов РФ на новые способы комбинированной обработки. Общее число публикаций включает в себя 36 наименования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (108 наименований) и приложений, включает 156 страниц машинописного текста, 65 рисунков и 17 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, её практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ работ, посвященных технологическому обеспечению параметров качества ПС деталей из труднообрабатываемых материалов в контексте современных тенденций технического прогресса.

Значительный вклад в развитие концепции и различных аспектов технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя, в том числе и формируемых с учетом явления технологического наследования, внесён трудами В.Ф. Безъязычного, В.Ю. Блюменштейна, А.С. Васильева, А.М. Дальского, К.С. Колесникова, Б.А. Кравченко, А.А. Маталина, А.Г. Одинцова, В.М. Смелянского, А.М. Сулим, А.Г. Суслова, С.Г. Хейфица, Л.В. Худобина, П.И. Ящерицына и др.

Показано существенное влияние состояния ПС деталей машин на их основные эксплуатационные свойства, а также вида и режимов механической обработки на отдельные характеристики состояния ПС (высотные параметры шероховатости, микротвердость, глубину распространения наклепа, величину, знак и глубину распространения остаточных напряжений, струк-

турно-фазовый состав и т.д.), что предопределяет зависимость эксплуатационных качеств деталей от технологии механической обработки заготовок.

Доказана возможность воздействия на характеристики состояния ПС и на эксплуатационные свойства деталей путем изменения элементов режима механической обработки. Установлено, что рациональное использование процесса технологического наследования позволяет создавать необходимый уровень некоторых параметров качества ПС на этапах техпроцесса, предшествующих окончательным.

Перспективным направлением совершенствования технологии механической обработки для формирования заданных параметров качества ПС является применение энергии УЗ поля. Различные аспекты использования энергии УЗ поля в процессах механической обработки заготовок исследовали В.К. Асташов, И.К. Вагапов, М.М. Ганиев, Е.С. Киселев, Д. Кумабэ, А.И. Марков, М.С. Нерубай, В.Н. Подураев, Б.Л. Штриков и др.

Применение ультразвука при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов позволяет существенно уменьшить требуемые усилия деформирования, снизить затраты на трение, значительно снижать абсолютную величину остаточных напряжений без высоких временных и энергетических затрат, усилить проникающее действие смазочно-охлаждающих технологических средств, релаксировать возникающие ТОН. Последнее особенно эффективно при введении в технологический процесс операций поверхностно-пластического деформирования (ППД).

Сформулированы цели и задачи работы, приведенные выше.

Во **второй главе** рассмотрен процесс формирования ТОН на последовательно выполняемых технологических операциях точения и шлифования или технологических переходах при комбинированной обработке с учетом технологического наследования.

Так как в процессе механической обработки со съемом припуска одновременно происходят процессы резания и пластической деформации, часть объема подлежащего удалению с заготовки материала пластически деформируется и будет частью вновь образованного ПС. Поэтому, ТОН, возникающие в ПС на i -ой операции технологического процесса на глубине, меньшей припуска Z_{i+1} (рис. 1), также будут оказывать влияние на величину ТОН в готовой детали. Это явление носит название суперпозиции или наложения зон наклепов. Кроме того, ПС обработанной детали будет деформироваться и упрочняться, что необходимо учитывать при расчетах. Величину ТОН с учетом технологического наследования можно определить по зависимостям (1-3) с учетом коэффициент наследования K_H :

$$\text{при } h_a < h_I: \quad \sigma_{i+1}(h_a) = K_H \cdot \sigma_i(Z_{i+1} - h_z^I [1 - h_a/h^I]) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a); \quad (1)$$

$$\text{при } h_I < h_a < h_z^{II}: \quad \sigma_{i+1}(h_a) = K_H \cdot \sigma_i(Z_{i+1} + [h_a - h^I] h_z^{II} / h^{II}) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a); \quad (2)$$

при $h_a > h_z^{\text{II}}$: $\sigma_{i+1}(h_a) = K_n \sigma_i(Z_{i+1} + h_a) + \sigma_{i+1}^{\text{TC}}(h_a)$, (3)

где h_I и h_{II} – соответственно, глубины ПС заготовки после $(i+1)$ -ой операции, на которых происходит наследование ТОН из зон h_z^{I} и h_z^{II} , мкм; $\sigma_{i+1}(h_a)$ – реальная величина ТОН после $(i+1)$ -ой операции на исследуемой глубине h_a , МПа.

Глубину пластически деформируемого материала припуска h_z^{I} рассчитаем по зависимости В.М. Смелянского для определения площади контакта сферического индентора (абразивного зерна) с цилиндрической заготовкой:

$$F = \frac{2 \pi h_z^{\text{I}} r_{a.z.} (2 R_{\text{заг}} + r_{a.z.})}{R_{\text{заг}} + r_{a.z.}}, \quad (4)$$

где $r_{a.z.}$ – радиус зерна, мм; F – площадь контакта индентора с заготовкой, мм²; $R_{\text{заг}}$ – радиус обрабатываемой заготовки, мм.

Величина упрочненного в процессе шлифования слоя h_z^{II} зависит от усилия деформирования и может быть приближенно определена по формуле, предложенной С.Г. Хейфецом:

$$h_z^{\text{II}} = \sqrt{P_{a.z.} / 2 \sigma_T}, \quad (5)$$

где $P_{a.z.}$ – усилие деформирования (воздействия) единичного абразивного зерна, Н; σ_T – предел текучести материала заготовки, МПа.

Кроме того, теплосиловая напряженность $(i+1)$ -ой операции ТП также оказывает влияние на величину K_n , причем на разной глубине ПС значения коэффициента будут различны вследствие неравномерного прогрева и длительности теплового воздействия. Так, на самой поверхности заготовки коэффициент наследования будет стремиться к максимуму ($K_n \approx 1$) вследствие кратковременности воздействия высоких контактных температур и быстрого охлаждения. С увеличением глубины ПС максимальная температура будет постепенно уменьшаться, однако время ее воздействия несколько возрастет. Следовательно, на данных глубинах ожидаются минимальные значения коэффициента K_n . С дальнейшим увеличением глубины ПС время температурного воздействия продолжит расти, но малые значения температуры не позволят эффективно релаксировать сформированные ТОН, следовательно, K_n будет стремиться к максимуму.

Определить K_n можно зная скорость релаксации ТОН на конкретной глубине ПС. В температурной области шлифования она находится в экспоненциальной зависимости от контактной температуры в зоне обработки и описывается зависимостью, полученной А.Х. Коттреллом:

$$\nu = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \tau} = G \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}, \quad (6)$$

где $\Delta \sigma$ – изменение остаточных напряжений за время $\Delta \tau$, МПа; G – модуль сдвига, МПа; Q – энергия активации релаксации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/моль·К; T – температура, при которой происходит процесс релаксации, К.

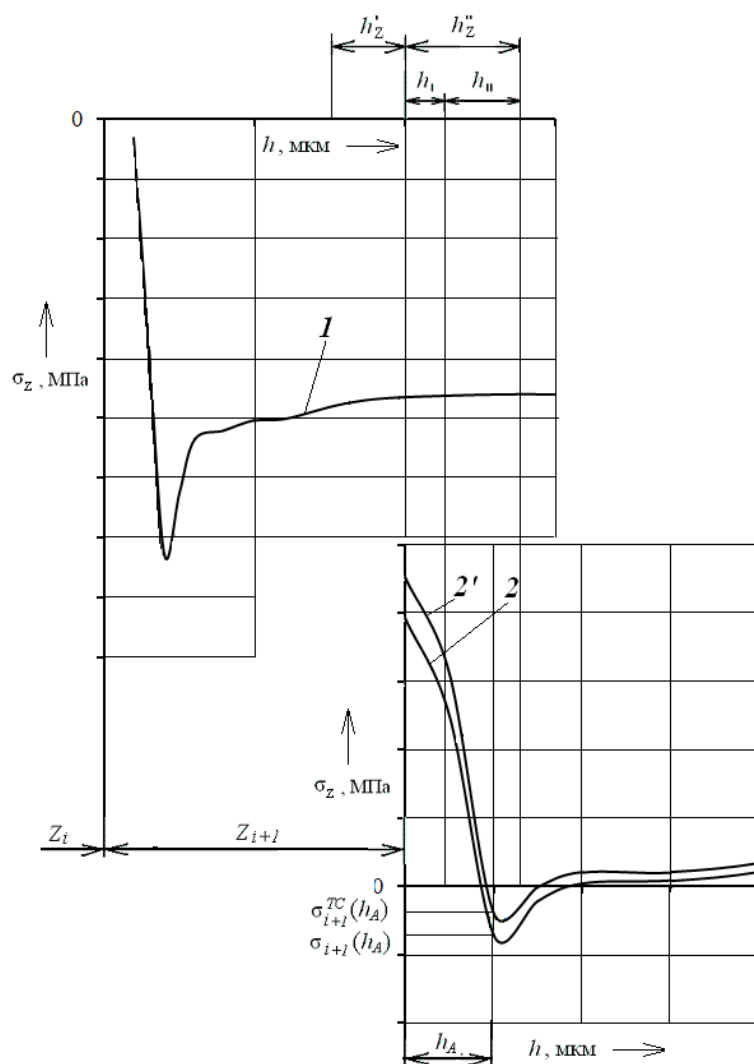


Рис. 1. Схема для определения ТОН в ПС заготовки с учетом пластического деформирования части припуска: Z_i – припуск, снимаемый на i -ой операции технологического процесса изготовления детали, мм; 1 – эпюра остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе i -ой операции; 2 – эпюра остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе $(i+1)$ -ой операции; $2'$ – эпюра ожидаемых остаточных напряжений, обусловленных теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции

Таким образом,

$$\sigma_0 - \sigma_\tau = \tau \cdot G \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}. \quad (7)$$

Эффективность релаксации определится по формуле:

$$E_p = \frac{\sigma_0 - \sigma_\tau}{\sigma_0}. \quad (8)$$

При $E_p = 1$ следует говорить о полной релаксации остаточных напряжений, при $E_p = 0$ – об ее отсутствии. Подставив (7) в формулу (8) получим следующее выражение для расчета эффективности релаксации:

$$E_p = \frac{\tau \cdot G}{\sigma_0 \cdot e^{\frac{Q}{R \cdot T}}}. \quad (9)$$

Коэффициент наследования при этом можно рассчитать по формуле:

$$K_n = 1 - E_p \quad (10)$$

В третьей главе изложены методика и результаты экспериментальных исследований влияния элементов режима комбинированной обработки (на примере точения и УЗТВ), а также УЗ релаксации на изменение уровня ТОН и фазового состава материала ПС образцов из типовых представителей различных групп труднообрабатываемых материалов: высокопрочных сталей (база для сравнения – 30ХГСА), коррозионно-стойких сталей ферритного и аустенитно-ферритного классов (40Х13 и 07Х16Н6), высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов (ВТ9 и ВТ3-1).

Фазовые изменения оценивали на приборе «РИКОР-7», остаточные напряжения – с использованием прибора «Ситон-АРМ» неразрушающими методами. Контактную температуру в зоне обработки оценивали методом полуискусственной термопары.

Наибольшее влияние на изменение фазового состава ПС заготовок из титановых сплавов, а следовательно, и величины ТОН при комбинированной обработке, как следует из анализа полученных экспериментальных данных, оказывает глубина резания t (см. рис. 2), увеличение которой способствует существенному сокращению α -фазы по сравнению с β -фазой в ПС заготовок из обоих рассматриваемых сплавов. На наш взгляд это связано с возрастанием температуры в зоне обработки и ускорением превращений типа $\alpha\text{-Ti} \rightarrow \beta\text{-Ti}$.

Приведенные на рис. 2, б результаты исследований по оценке влияния комбинированной обработки точением и УЗТВ с различной глубиной резания t на ТОН в ПС заготовок из сплава ВТ9 демонстрируют, что до глубины 80 мкм сжимающие напряжения с ростом параметра t увеличиваются (поверхностный слой упрочняется). С глубины ПС свыше 80 мкм вследствие перераспределения остаточных напряжений наблюдается обратная зависимость – остаточные напряжения из области сжимающих переходят в растягивающие.

Увеличение t при обработке заготовок из сплава ВТ3-1 на первоначальном этапе (до 0,75 мм) приводят к снижению величины сжимающих напряжений вследствие роста температур и образования β -фазы (см. рис. 2, а). Однако, дальнейшее увеличение t и связанный с этим рост радиальной составляющей силы обработки приводят к возрастанию количества дислокаций в материале ПС заготовок и, как следствие, формированию больших величин сжимающих ТОН.

С увеличением продольной подачи S и усилия прижима индентора P происходит распад β -титана (т.е. активизация обратного перехода $\beta\text{-Ti} \rightarrow \alpha\text{-Ti}$). Это приводит к упрочнению материала ПС (снижению растягивающих напряжений в заготовках из сплава ВТ9 и росту сжимающих напряжений для сплава ВТ3-1). По-видимому, это объясняется интенсификацией процессов пластической деформации и распадом β -титана под воздействием давления в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Необходимо отметить, что с увеличением усилия прижима индентора до 300 Н, наблюдается некоторое уменьшение уровня сжимающих ТОН, что свидетельствует о начале разупрочнения материала ПС вследствие перенаклепа.

Как и в случае с глубиной резания, с увеличением подачи S наблюдается рост сжимающих напряжений до глубины 70 мкм, но, вследствие перераспределения напряжений, на глубине ПС свыше 70 мкм видна обратная зависимость. Рост сжимающих напряжений может быть связан с распадом β - титана и переходом его в α -фазу.

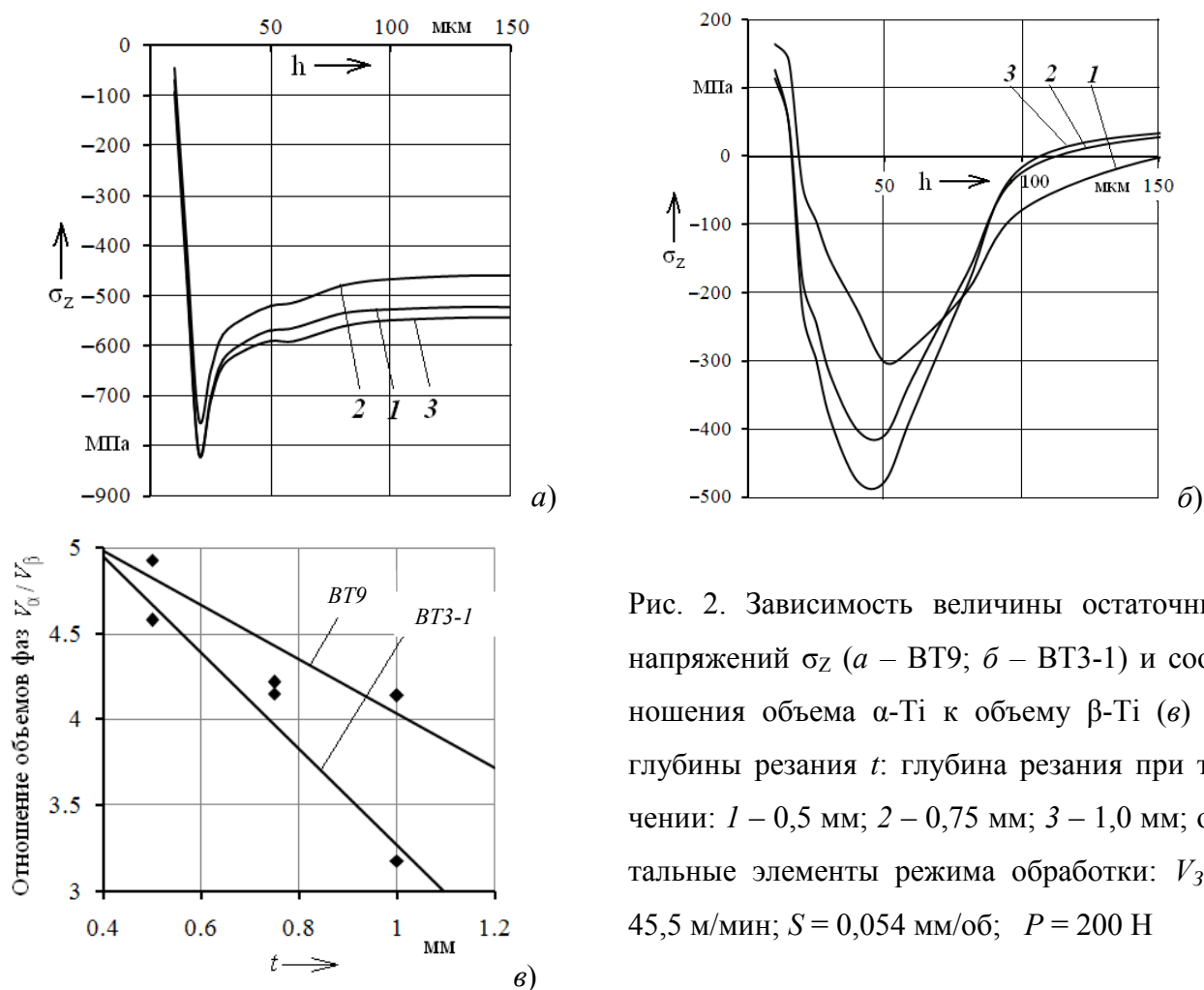


Рис. 2. Зависимость величины остаточных напряжений σ_z (а – VT9; б – VT3-1) и соотношения объема α -Ti к объему β -Ti (в) от глубины резания t : глубина резания при точении: 1 – 0,5 мм; 2 – 0,75 мм; 3 – 1,0 мм; остальные элементы режима обработки: $V_3 = 45,5$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н

Увеличением усилия прижима выравнивателя (индентора) P при комбинированной обработке заготовок из сплава VT9 (см. рис. 2, б) приводит к увеличению ТОН, что объясняется ростом количества дислокаций в ПС и интенсификацией обратного фазового перехода $\beta \rightarrow \alpha$ под действием контактного давления в зоне выравнивания. Так как контактные температуры при УЗТВ крайне малы, то релаксация полученных напряжений вследствие отпускных процессов незначительна. С увеличением P до 200 Н при обработке образцов из титанового сплава VT3-1 наблюдается рост величины сжимающих ТОН. Однако, данные полученные после обработки с

$P = 300$ Н демонстрируют снижение сжимающих остаточных напряжений, что на взгляд авторов связано с увеличением контактной температуры, началом отпускного разупрочнения материала ПС и может быть отнесено к особенностям данного сплава, выражающимся в доминировании теплового фактора при формировании остаточных напряжений.

Для заготовок из сплава ВТ3-1 увеличение скорости V_3 способствует образованию α -фазы и росту нежелательных растягивающих остаточных напряжений, в то время как для сплава ВТ9 эта зависимость носит обратный характер – с увеличением скорости активизируется распад β -фазы. На наш взгляд, это объясняется различиями в химическом составе сплавов. Так, сплав ВТ3-1 в качестве основного легирующего элемента содержит железо, количество которого практически в 3 раза больше, чем в ВТ9 (0,7% против 0,25%). Повышенное содержание железа увеличивает склонность титановых сплавов к образованию интерметаллидов состава TiFe и TiFe₂. Сплав ВТ9 характеризуется повышенным (по сравнению с ВТ3-1) содержанием циркония (до 2% для ВТ9 и до 0,5% для ВТ3-1) и не образует интерметаллиды состава TiFe и TiFe₂.

Из результатов исследований следует, что напряженно-деформированное состояние ПС заготовок из титановых сплавов мало зависит от окружной скорости заготовки V_3 . Её увеличение вызывает уменьшение абсолютной величины сжимающих ТОН, что связано, на наш взгляд, с изменением теплонапряженности процесса комбинированной обработки и интенсификацией структурно-фазовых переходов.

Исследования технологического наследования остаточных напряжений (см. рис. 3) и определение коэффициентов наследования K_n производили на заготовках, которые подвергались обработке комбинированным точением и УЗТВ, после чего подвергались обработке врезным шлифованием.

На рис. 4 представлены графики изменения расчетных коэффициентов K_n остаточных напряжений по глубине ПС шлифованных заготовок. Анализ результатов показывает, что на самой поверхности заготовки в зоне контакта с инструментом коэффициент наследования стремится к 1 (то есть релаксация практически отсутствует и ТОН полностью переносятся с предварительно обработанной заготовки). На большей глубине наблюдается значительное (для сталей 30ХГСА и 07Х16Н6, а также титанового сплава ВТ9) снижение величины K_n , однако, на глубине ПС порядка 30...40 мкм коэффициент наследования вновь начинает расти.

Таким образом, полученные результаты подтверждают выдвинутую ранее гипотезу о влиянии температуры в зоне обработки и свойств исследуемого материала на изменение величины коэффициента наследования по глубине ПС обработанной заготовки.

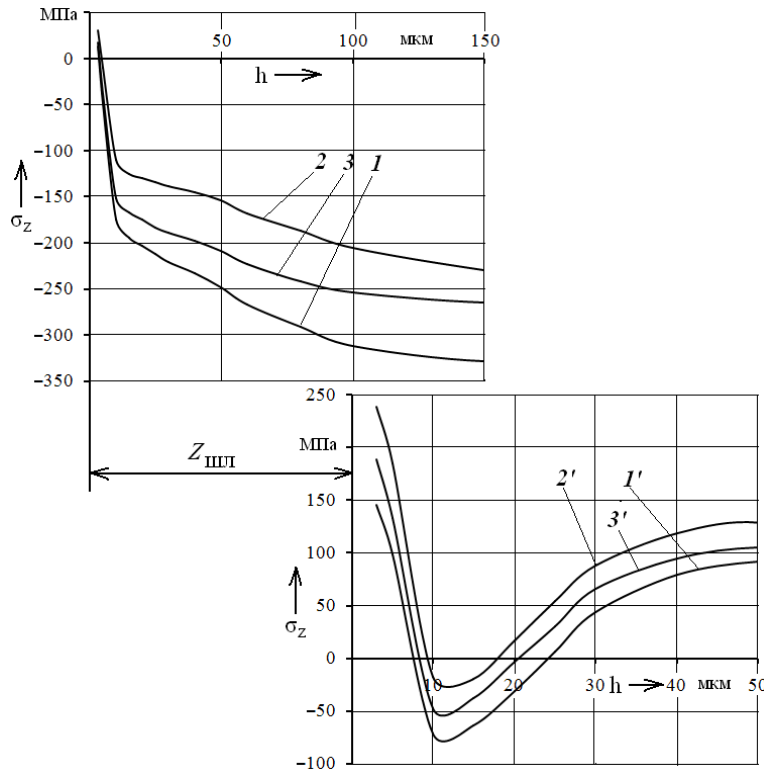


Рис. 3. Схема технологического наследования ТОН в ПС заготовок из стали 30ХГСА при изменении режима обработки точением и УЗТВ: 1 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 35.2$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 1$ мм, $V_3 = 54.9$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 200$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 44$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 300$ Н; 1', 2', 3' – ТОН после комбинированного точения и УЗТВ; 1', 2', 3' – ТОН в ПС шлифованных деталей (круг 24AF8M7V50 1-600x25x305, $Z_{\text{шл}} = 0,1$ мм; $V_3 = 30$ м/мин; $V_k = 35$ м/с)

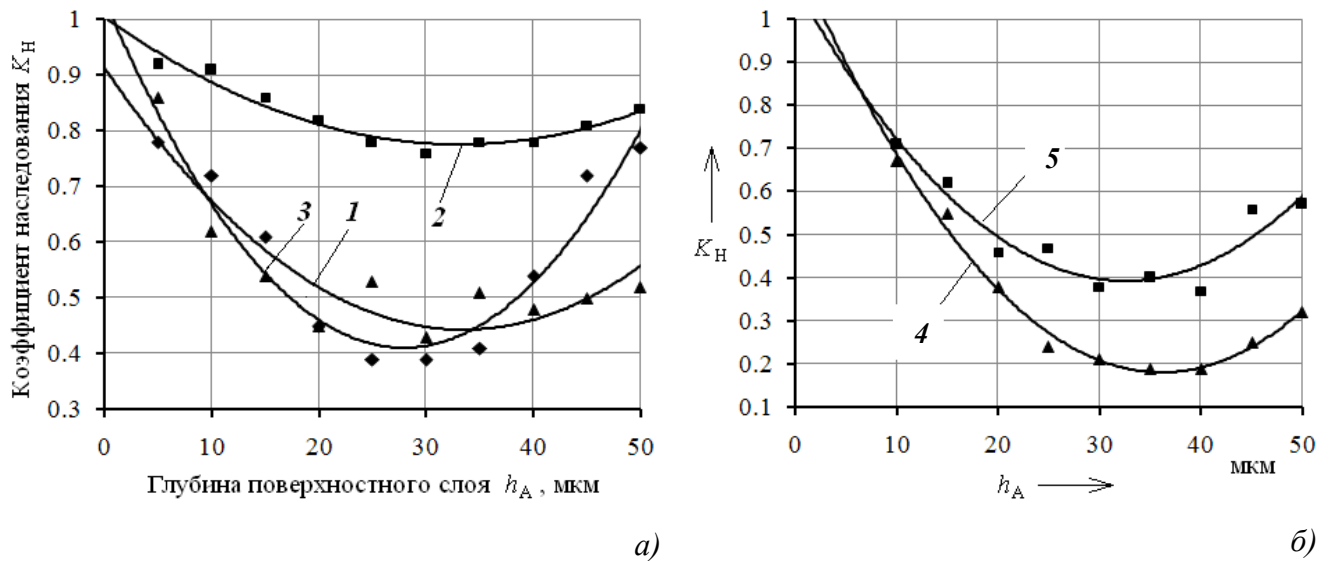


Рис. 4. Графики изменения коэффициента наследования K_H остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок из: 1 – 30ХГСА (а, ▲); 2 – 40Х13 (а, ■); 3 – 07Х16Н6 (а, ◆); 4 – ВТ3-1 (б, ▲); 5 – ВТ9 (б, ■); условия обработки для стали 30ХГСА – см. рис. 3

На рис. 5 показаны диаграммы, иллюстрирующие технологическое наследование фазового состава ПС заготовок из титановых сплавов ВТ9 и ВТ3-1. Как видно из результатов исследований, характер соотношения объемов фаз α - и β -титана после шлифования идентичен характеру после комбинированной обработки точением и УЗТВ.

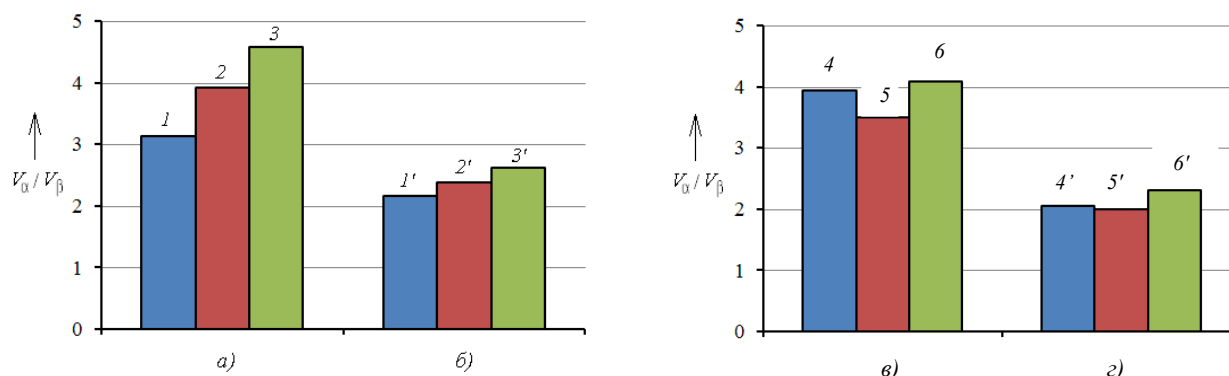


Рис. 5. Изменение фазового состава ПС заготовок из сплавов ВТ9 (а, б) и ВТ3-1 (в, г) в ходе комбинированной обработки точением и УЗТВ (1–6) и шлифования (1'–6'): 1 – $t = 1$ мм, $V_3 = 57.4$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 45.5$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 300$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 36.4$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 200$ Н; 4 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 63.5$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 300$ Н; 5 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 50.8$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 100$ Н; 6 – $t = 1$ мм, $V_3 = 40.6$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 200$ Н

Эффективность УЗ релаксации (см. рис. 6) существенно зависит от времени «озвучивания». Причем разница в скорости релаксации (МПа/мин) для определенных групп материалов, используемых при исследованиях, примерно одинакова и составляет: 140-160 МПа/мин для сталей и 70-80 МПа/мин для титановых сплавов.

Изменение характера кривой $\sigma_Z(\tau_{узр})$ для стали 30ХГСА (рис. 6, кривая 1) после 1,5 мин обработки (существенное снижение скорости релаксации) связано, на взгляд автора, с так называемым «насыщением», что согласуется с результатами, полученными Е.С. Киселевым и В.Н. Ковальновым.

Кроме того, анализ результатов исследований показал, что увеличение P оказывает незначительное влияние на эффективность снятия ТОН по сравнению с влиянием времени релаксации $\tau_{узр}$. Это может объясняться малым изменением площади фактического пятна контакта индентора с ПС заготовки при небольшом увеличении усилия прижима (порядка 10-20 Н).

Полученные во второй главе зависимости для расчета эпюры ТОН и коэффициента наследования были использованы при численном расчете данных параметров на примере обработки заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА. Наиболее близкое значение расчетного критерия Фишера к табличному (расчетное значение равно 4,38, табличное – 4,46) получили при расчете эпюры остаточных напряжений по предлагаемой во второй главе методике.

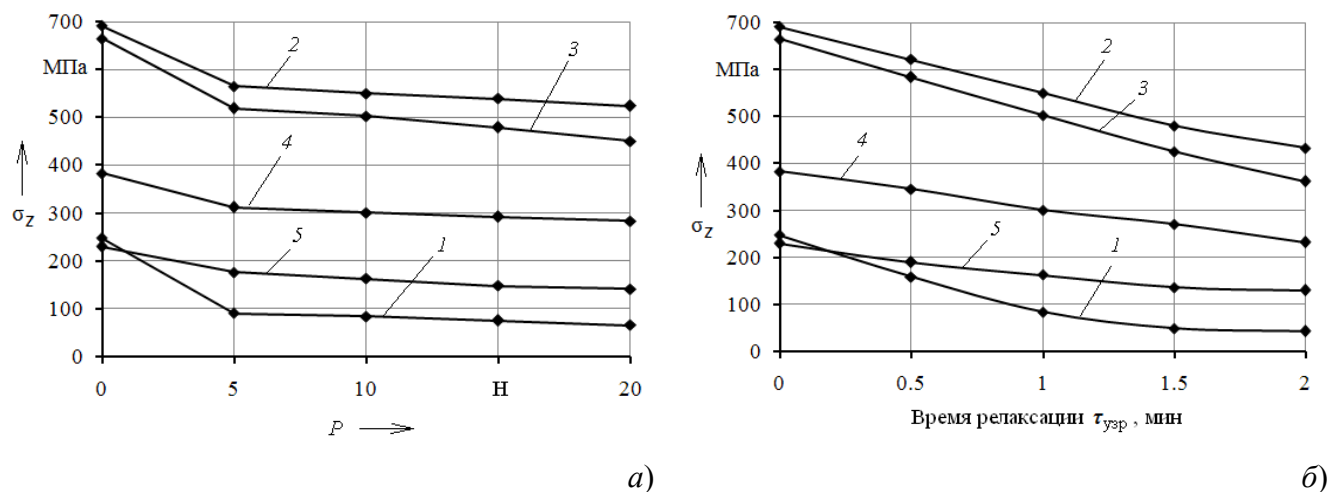


Рис. 6. Влияние усилия прижима индентора P (а) и времени $\tau_{узр}$ (б) УЗ релаксации на эффективность снятия ТОН в ПС заготовок из: 1 – 30ХГСА; 2 – 40Х13; 3 – 07Х16Н6; 4 – ВТ9; 5 – ВТЗ-1

Расхождение результатов численного расчета коэффициента наследования K_n и экспериментального определения в лабораторных условиях не превышает 24 %, что находится в пределах точности эксперимента, что свидетельствует об адекватности разработанных математических зависимостей реальным условиям обработки и о возможности использования этих зависимостей для прогнозирования величины ТОН и коэффициента наследования.

В четвертой главе представлены технологические рекомендации по направленному формированию параметров качества ПС деталей из труднообрабатываемых материалов. Описаны условия обеспечения качества ПС при ультразвуковой обработке, последовательность назначения режима обработки, выбора характеристик индентора и смазочно-охлаждающих технологических средств как для комбинированной обработки точением и УЗТВ, так и УЗ релаксации. Указана типовая последовательность выполнения технологических операций.

Приведены результаты опытно-промышленной апробации результатов теоретико-экспериментальных исследований на ЗАО «Авиастар-СП». В качестве объекта для расчета ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов экспериментальных исследований выбран тонкостенный стакан из высокопрочного титанового сплава ВТ22.

Анализ результатов технологической эффективности показывает, что основными источниками экономической эффективности предлагаемых устройств являются:

- 1) Повышение производительности за счёт сокращения машинного времени при неизменном качестве деталей.
- 2) Повышение качества обработанных деталей и улучшение их эксплуатационных характеристик.

Для повышения производительности изготовления стакана предложено исключить операции естественного старения и заменить их УЗ релаксацией полосовым твердосплавным индентором. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составил более 98 тыс. руб.

В **заключении** изложены основные результаты исследований и показаны пути дальнейшего их использования для совершенствования и разработки новых технологий механической обработки заготовок.

Приложения включают состав экспериментальных исследований, метрологическую оценку результатов исследований, акт опытно-промышленной апробации и др.

3. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Выполнен комплекс теоретико-экспериментальных исследований процесса технологического наследования ТОН и фазового состава материала ПС в процессе изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов с использованием энергии УЗ поля. В результате исследований получены следующие научные выводы и практические результаты:

1) Установлены основные пути решения актуальной научной проблемы повышения эффективности механической обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов путем управления формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний.

2) Разработана новая методика оценки наследования остаточных напряжений в ПС заготовок, учитывающая раздельное влияние теплосиловой напряженности окончательной и сформированных в ходе предварительной обработки остаточных напряжений по глубине.

3) Предложена методика определения коэффициента наследования, учитывающая теплосиловую напряженность процесса обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала на эффективность релаксации ТОН.

4) Разработаны новые способы комбинированной обработки для формирования заданного уровня ТОН и фазового состава поверхностного слоя заготовок с использованием энергии УЗ поля.

5) Определенные экспериментально коэффициенты наследования не превышают 1, что совпадает с прогнозами других ученых. Наибольший коэффициент наследования выявлен при обработке заготовок из коррозионно-стойкой стали ферритного класса 40Х13.

6) Силовые воздействия, с которыми сопряжена операция комбинированной обработки точением и УЗТВ, могут оказывать отрицательное влияние на фазовый состав ПС заготовок из двухфазных коррозионно-стойких сталей, вызывая распад аустенита. Результаты исследований

показали, что подобные изменения фазового состава распространяются на глубину, превышающую припуск на последующую обработку и, вследствие процесса технологического наследования, переносятся на готовую деталь.

7) УЗ релаксация с использованием полосового твердосплавного индентора позволяет эффективно снижать абсолютную величину ТОН в ПС заготовок из различных материалов за достаточно короткое время (до 250 МПа за 1 мин обработки).

8) Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследований на ЗАО «Авиастар-СП» составил свыше 98 тыс. руб.

Содержание диссертации опубликовано в следующих основных работах:

Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Киселев Е.С., Романов С.А., Лексин Е.Н., Благовский О.В. Направленное формирование остаточных напряжений путем использования технологических возможностей комбинированной обработки заготовок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов: СГТУ. – 2009. – № 3. – С. 103–105.

2. Киселев Е.С., Благовский О.В. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей с учетом технологической наследственности / Вестник машиностроения. – 2011. – № 6. – С. 33–36.

3. Киселев Е.С., Благовский О.В. Применение ультразвуковой обработки при изготовлении ответственных деталей / Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 33–37.

4. Киселев Е.С., Лексин Е.Н., Романов С.А., Благовский О.В. Возможности комбинированной обработки в формировании заданного уровня остаточных напряжений в поверхностном слое / СТИН. – 2012. – № 2. – С. 25–29.

5. Киселев Е.С., Благовский О.В. Технологические возможности ультразвуковой релаксации остаточных напряжений полосовым твердосплавным индентором / Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 3. – С. 9–14.

Патенты

6. Способ комбинированной обработки шлифованием и поверхностным пластическим деформированием: пат. № 2423220 РФ. – Е.С. Киселев, С.А. Романов, Е.Н. Лексин, О.В. Благовский. – заяв. № 2009140278/02; заявл. 30.10.2009; опубл. 10.07.2011, бюл. № 19.

7. Способ комбинированной обработки шлифованием и поверхностным пластическим деформированием: пат. № 2464153 РФ. – Е.С. Киселев, Е.Н. Лексин, О.В. Благовский. – заяв. № 2011107496/02; заявл. 25.02.2011; опубл. 20.10.2012, бюл. № 29.

8. Способ комбинированной обработки шлифованием и поверхностным пластическим деформированием: пат. № 2464154 РФ. – Е.С. Киселев, Е.Н. Лексин, О.В. Благовский. – заяв. № 2011107502/02; заявл. 25.02.2011; опубл. 20.10.2012, бюл. № 29.

9. Способ комбинированной обработки шлифованием и поверхностным пластическим деформированием: пат. № 2464155 РФ. – Е.С. Киселев, Е.Н. Лексин, О.В. Благовский. – заяв. № 2011107503/02; заявл. 25.02.2011; опубл. 20.10.2012, бюл. № 29.

10. Способ комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием: пат. № 2495741 РФ. – Е.С. Киселев, О.В. Благовский, Р.С. Кабиров. – заяв. № 2012128014/02; заявл. 03.07.2012; опубл. 20.10.2013, бюл. № 29.

11. Способ комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием: пат. № 2503532 РФ. – Е.С. Киселев, О.В. Благовский, Р.С. Кабиров. – заяв. № 2012127925/02; заявл. 03.07.2012; опубл. 10.01.2014, бюл. № 01.

12. Способ поверхностного пластического деформирования: пат. № 2548848 РФ. – Е.С. Киселев, О.В. Благовский. – заяв. № 2013148354/02; заявл. 29.10.2013; опубл. 20.04.2015, бюл. № 11.

13. Способ обработки маложестких заготовок сложнопрофильных деталей: пат. № 2558311 РФ. – Е.С. Киселев, О.В. Благовский. – заяв. № 2013148350/02; заявл. 29.10.2013; опубл. 10.05.2015, бюл. № 21.

Публикации в других изданиях

14. Kiselev E.S., Blagovskiy O.V. Inheritance and the residual stress in the surface layer of machine parts / Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31. – № 6. – P. 545-548.

15. Kiselev E.S., Blagovskiy O.V. Determination of the residual stresses in the surface layer of responsible machine parts with the light of technological heredity / XIX International scientific-technical conference «trans&MOTAUTO». – Varna. – 2011. – Vol. 1. – P. 77-80.

БЛАГОВСКИЙ О. В.

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЯХ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать _____.2015. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Усл. печ. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Зак. _____.

Типография УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.