

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

© 2017

**Е. С. Киселев** доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»; Ульяновский государственный технический университет; [kec.ulstu@mail.ru](mailto:kec.ulstu@mail.ru)

**О. В. Благовский** кандидат технических наук, инженер-конструктор; Ульяновский механический завод; [oleg\\_vbm@mail.ru](mailto:oleg_vbm@mail.ru)

Рассмотрен подход для решения актуальной задачи обеспечения размерной стабилизации нежестких деталей летательных аппаратов из титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей. Известно, что существенная потеря точности и изменение пространственной ориентации поверхностей нежестких деталей связаны с формированием в поверхностных слоях нежелательных технологических остаточных напряжений. Предложен способ снижения величины остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических деталей путём ультразвуковой обработки индентором, имеющим полосовой контакт с обрабатываемой заготовкой. Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на исключение длительной операции термической релаксации технологических остаточных напряжений из процесса изготовления нежестких деталей с помощью рационального использования процесса технологического наследования и энергии ультразвукового поля. Показана высокая эффективность разработанного способа и возможность применения его для стабилизации размерной точности нежестких и тонкостенных заготовок из труднообрабатываемых материалов.

*Нежесткие детали; поверхностный слой; остаточные напряжения; фазовый состав; технологическое наследование.*

---

*Цитирование:* Киселев Е.С., Благовский О.В. Новые технологии изготовления нежестких деталей из титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 2. С. 157-163. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-157-163

---

В настоящее время в конструкциях двигателей летательных аппаратов всё более широкое распространение получает использование нежестких деталей, исполнительные поверхности которых работают при повышенных температурах и 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 четвёртого поколения на 2006 год составляла порядка 89% [1].

Проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств при изготовлении нежестких деталей из труднообрабатываемых материалов, в которых возникающие из-за теплосилового напряжённости и структурно-фазовых превращений остаточные напряжения любого знака способны вызвать значительные изменения в форме и пространственной ориентации, стоит существенно острее, чем для других конструкционных материалов. Это объясняется тем, что их тепло- и температуропроводность до 4-5 раз меньше, чем у конструкционных углеродистых сталей и вся теплота, возникающая в зоне резания, локализуется в поверхностном слое обрабатываемой заготовки. На практике это приводит к необходимости существенно снижать элементы режима, а в некоторых случаях даже подбирать опытным путём 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 (временную) релаксацию остаточных напряжений. Уменьшать уровень технологических остаточных напряжений (ТОН) можно как сразу после окончательной обработки заготовки, обычно являющейся наиболее теплонапряжённой, 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 изготовлении нежестких деталей (поверхностно-пластическое деформирование).

Весьма перспективным является использование для этой цели энергии ультразвукового (УЗ) поля [1; 2]. 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 учёта процесса технологического наследования. Последнее оказывает существенное влияние на уровень ТОН в готовых деталях. Отсутствие теории, практических рекомендаций и методик учёта наследования затрудняет разработку оптимальных технологических процессов изготовления нежестких деталей из труднообрабатываемых материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Решение данных проблем позволяет повысить точность обработки, уменьшить длительность технологического цикла и снизить себестоимость изготовления деталей.

Экспериментальные исследования влияния элементов режима комбинированной обработки на примере точения и ультразвукового твёрдосплавного выглаживания (УЗТВ), а также УЗ релаксации на ТОН и фазовый состав (ФС) выполнены для 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 (BT9 и BT3-1).

Рассмотрим часть технологического процесса изготовления деталей типа тела вращения, включающую в себя операцию комбинированного точения и ультразвукового твёрдосплавного выглаживания (УЗТВ) с различными элементами обработки. Резец оснащён твёрдосплавной пластиной Korloy CCMT 060204-NPF NC8010 (для титановых сплавов) и Korloy CCMT 060204-NMP NC-9020 (для коррозионно-стойких сталей); индентором – пластиной Korloy CCMT 120408-HS NC-9025, позволяющей создавать наибольшие по величине сжимающие ТОН и распространять их на максимально возможную глубину ПС. Обработку выполняли на токарно-винторезном станке повышенной точности УТ16П с последующим круглым наружным шлифованием с фиксированными элементами режима обработки (круглошлифовальный станок 3М151В, круг 24AF8M7V50 1-600x25x305). Схема комбинированной обработки показана на рис. 1.

Образцами при исследованиях служили валики диаметром от 50 до 65 мм и длиной 200 мм. Ультразвуковые колебания (частота  $f = 22$  кГц, амплитуда  $A = 10-12$  мкм) накладывали на твёрдосплавный индентор от УЗ-генератора УЗГ-641А.

Обработку точением и шлифованием осуществляли с подачей к зоне контакта инструмента с заготовкой 3-процентного водного раствора концентрата полусинтетической смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) Велс-1 (расход: 10 л/мин – точение; 40 л/мин – шлифование).

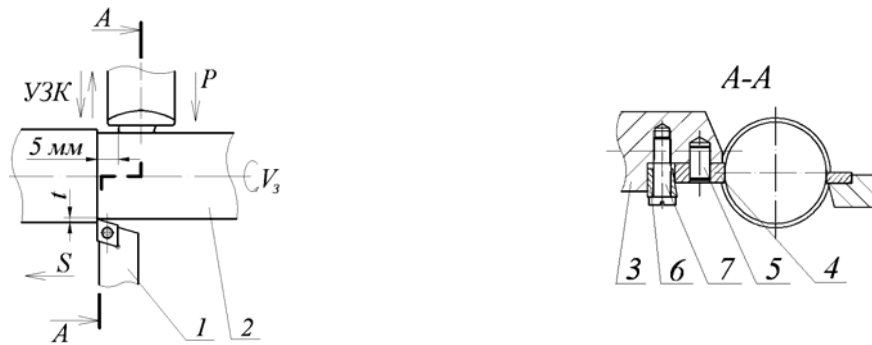


Рис. 1. Схема комбинированной обработки точением и УЗТВ:  
 1 – резец; 2 – заготовка; 3 – концентратор; 4 – деформирующий элемент;  
 5 – штифт; 6 – прижим; 7 – винт

Поверхностное пластическое деформирование на стадии комбинированной обработки выполняли с подачей в зону контакта твёрдосплавного индентора с заготовкой 100-процентного концентрата СОЖ Велс-1 с расходом 5 г/ч путём нанесения её на контактирующие объекты кистью.

Технологические остаточные напряжения обработанных деталей измеряли неразрушающим методом при помощи измерительно-вычислительного комплекса СИТОН-АРМ, предназначенного для автоматизированного неразрушающего измерения ТОН в ПС изделий из металлов и сплавов; фазовый состав определяли с использованием рентгеновского комплекса РИКОР-7, позволяющего качественно и количественно оценивать соотношение фаз материала ПС.

Исследования технологического наследования остаточных напряжений (рис. 2) и определение коэффициентов наследования  $K_n$  производили на заготовках, которые подвергались комбинированной обработке точением и УЗТВ, после чего образцы подвергались обработке резным шлифованием [3].

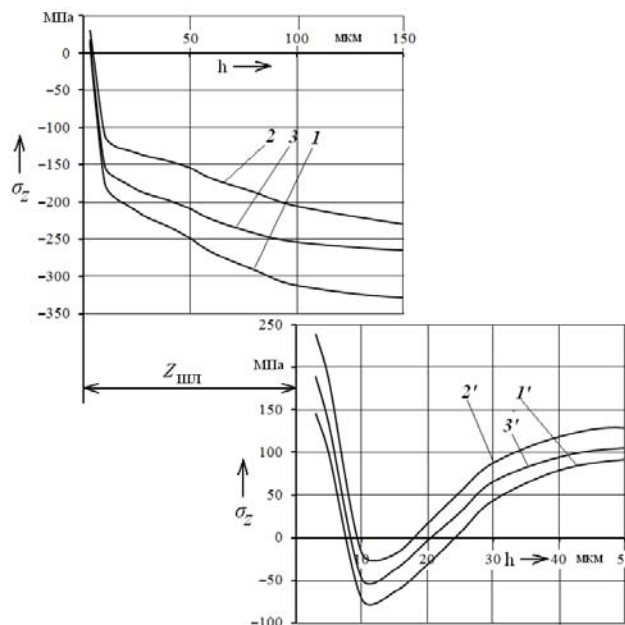


Рис. 2. Примеры технологического наследования ТОН в ПС заготовок из стали 30ХГСА при изменении режима обработки точением и УЗТВ:

- 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 1–600×25×305,  $Z_{\text{шл}} = 0,1$  мм;  $V_3 = 30$  м/мин;  $V_k = 35$  м/с)

На рис. 3 представлены графики изменения расчётных коэффициентов  $K_H$  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 (релаксация практически отсутствует и ТОН полностью переносятся с предварительно обработанной заготовки). На большей глубине наблюдается значительное (для сталей 30ХГСА и 07Х16Н6, титанового сплава ВТ9) снижение величины  $K_H$ . Однако на глубине ПС порядка 30–40 мкм коэффициент наследования вновь начинает расти.

Таким образом, полученные результаты наглядно демонстрируют влияние температуры в зоне обработки и свойств исследуемого материала на изменение величины коэффициента наследования по глубине ПС обработанной заготовки.

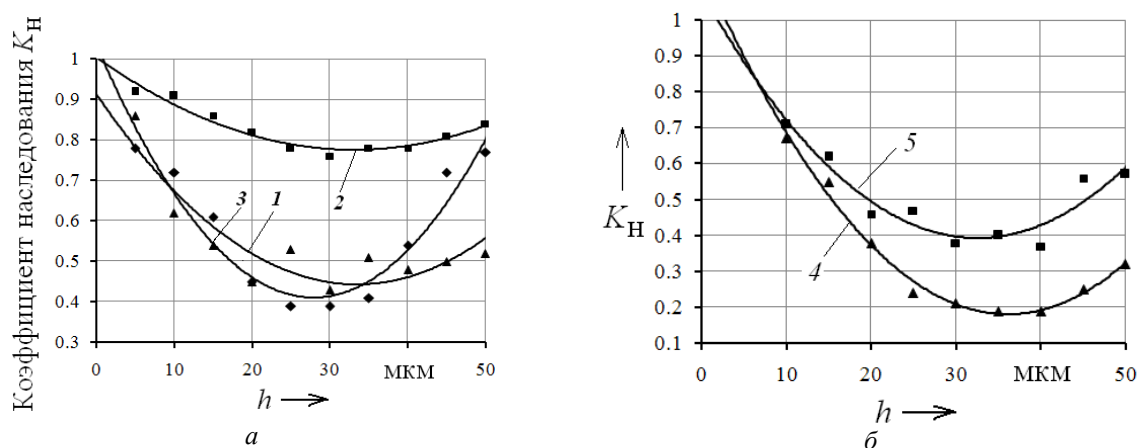


Рис. 3. Графики изменения коэффициента наследования  $K_H$  остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок из:

1 – 30ХГСА (а, ▲); 2 – 40Х13 (а, ■); 3 – 07Х16Н6 (а, ◆); 4 – ВТ3-1 (б, ▲); 5 – ВТ9 (б, ■)

Исследования технологического наследования фазового состава материала ПС заготовок из коррозионно-стойкой стали 07Х16Н6 проводили в следующей последовательности: заготовки предварительно обрабатывались комбинированным точением и УЗТВ с различными элементами режима, после чего шлифовались с врезной подачей (рис. 4). Таким образом определяли влияние элементов режима предварительной обработки (глубины резания  $t$ , окружной скорости заготовки  $V_s$ , продольной подачи  $S$  и усилия прижима индентора  $P$ ) на процентное количество аустенита в шлифованных образцах.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет утверждать, что подобные изменения фазового состава распространяются на глубину, превышающую припуск на последующую обработку, и в процессе технологического наследования переносятся на готовую деталь. При этом окружная скорость заготовки  $V_s$  и продольная подача  $S$  незначительно влияют на количество наследуемого аустенита (изменение его процентного содержания составляет менее 5% от объёма ПС). По результатам эксперимента рост глубины резания  $t$  снижает количество аустенита в шлифованных заготовках почти на 10%. Похожая картина наблюдается и при увеличении усилия прижима индентора  $P$ , когда снижение количества аустенита достигает 17%.

Полученные результаты, как и в случае с ТОН, связаны с изменением радиальных составляющих сил комбинированной обработки при точении и УЗТВ, вызывающих распад аустенита, а также влиянием на образование и распад зёрен аустенита, сформированных в ПС заготовки на этапе предварительной обработки остаточных напряжений.

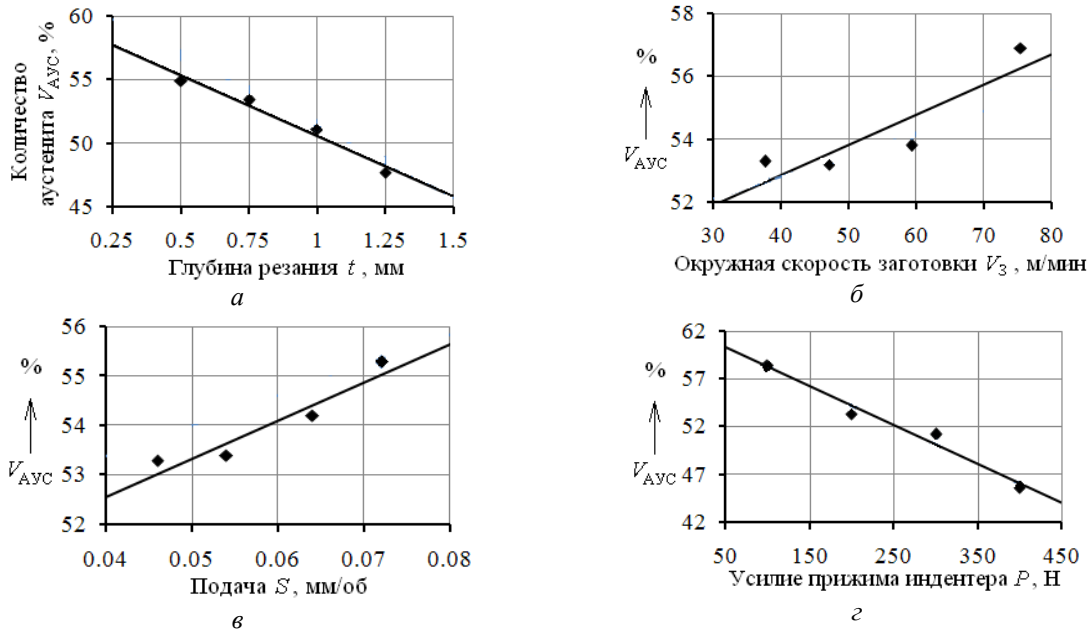


Рис. 4. Зависимость количества аустенитной фазы в поверхностном слое шлифованных заготовок из коррозионно-стойкой стали 07X16H6 от различных элементов режима предварительной комбинированной обработки точением и УЗТВ

На рис. 5 показаны диаграммы, иллюстрирующие технологическое наследование фазового состава ПС заготовок из титановых сплавов ВТ9 и ВТ3-1, обработанных в последовательности аналогично обработке заготовок из стали 07X16H6. Как видно из результатов исследований, характер соотношения объёмов фаз  $\alpha$ - и  $\beta$ -титана после шлифования идентичен характеру после комбинированной обработки точением и УЗТВ.

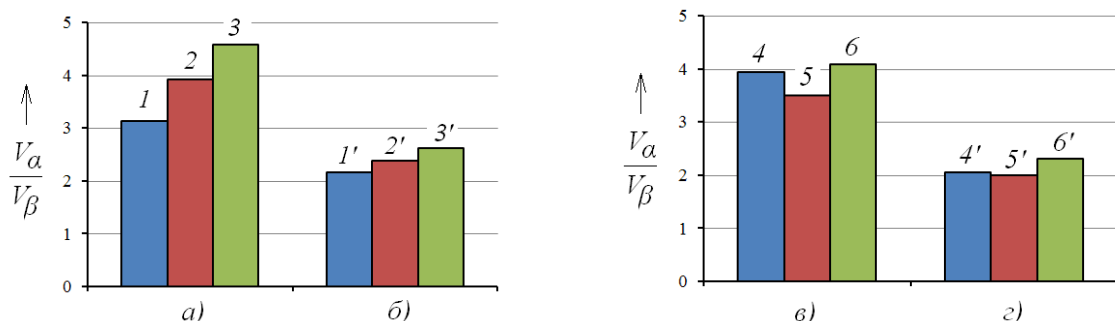


Рис. 5. Изменение фазового состава ПС заготовок из сплавов ВТ9 (а, б) и ВТ3-1 (в, г) в ходе комбинированной обработки точением и УЗТВ (1–6) и шлифования (1'–6'):

- 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

Выполненный комплекс экспериментальных исследований процесса технологического наследования ТОН и фазового состава материала ПС в процессе изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов с использованием энергии УЗ поля позволил установить основные пути решения актуальной научной проблемы – повышения эффективности механической обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов путём управления формированием остаточных напряжений в нежёстких деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что 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.

2. Полученные экспериментально коэффициенты наследования не превышают 1, что совпадает с оценками других исследователей. Наибольший коэффициент наследования выявлен при обработке заготовок из коррозионно-стойкой стали ферритного класса 40X13.

3. Разработанный новый способ комбинированной обработки заготовок точением и УЗТВ позволяет эффективно формировать заданный уровень ТОН и фазового состава поверхностного слоя с использованием энергии УЗ поля.

Исследования проведены в рамках выполнения гранта РФФИ по проекту 15-48-02633.

### **Библиографический список**

1. Качан А.Я., Мозговой В.Ф., Беликов С.Б., Внуков Ю.Н., Карась В.П. Основные направления развития прогрессивных технологий и металлорежущих станков с ЧПУ // Вестник двигателестроения. 2007. № 2. С. 82-85.

2. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. М.: Российская академия наук, 2008. 250 с.

3. Kiselev E., Blagovskiy O. 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'11». V. 1. Varna, Bulgaria, 2011. P. 75-78.

## **NEW TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING NON-RIGID PARTS MADE OF TITANIUM ALLOYS AND STAINLESS STEELS**

© 2017

**E. S. Kiselev** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology;  
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation;  
[kcc.ulstu@mail.ru](mailto:kcc.ulstu@mail.ru)

**O. V. Blagovskiy** Candidate of Science (Engineering), design engineer;  
Ulyanovsk mechanical plant, Ulyanovsk, Russian Federation;  
[oleg\\_vbm@mail.ru](mailto:oleg_vbm@mail.ru)

The article considers a new approach to solving a topical scientific problem of providing dimensional stabilization of non-rigid aircraft parts made of titanium alloys and stainless steels. It is known that a significant loss of accuracy and a change in the spatial orientation of surfaces of non-rigid parts are associated with the formation of undesirable technological residual stresses in the surface layers. The authors of the work propose a method of reducing the magnitude of residual stresses in the surface layer of cylindrical parts by ultrasonic treatment with an indenter having strip contact with the workpiece. We present the results of experimental research aimed at eliminating the lengthy operation of thermal relaxation of residual stresses in the process of manufacturing non-rigid parts made of titanium alloys and stainless steels through the rational use of technological heredity phenomena and ultrasonic field energy. The developed method is highly efficient and can be used to stabilize dimensional accuracy of non-rigid and thin-walled parts made of hard-to-machine materials.

*Surface layer; non-rigid parts; residual stresses; phase composition; technological heredity.*

---

*Citation:* Kiselev E.S., Blagovskiy O.V. New technologies of manufacturing non-rigid parts made of titanium alloys and stainless steels. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 2. P. 157-163. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-157-163

### References

1. Kachan A.Ya., Mozgovoy V.F., Belikov S.B., Vnukov Yu.N., Karas' V.P. The main tendencies of the development of advanced technologies and CNC cutting machine tools. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2007. No. 2. P. 82-85. (In Russ.)
2. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomassoperenosa* [Machining of workpieces in conditions of critical heat and mass transfer]. Moscow: Russian Academy of Sciences Publ., 2008. 250 p.
3. Kiselev E., Blagovskiy O. 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'11»*. V. 1. Varna, Bulgaria, 2011. P. 75-78.