

УДК 004.65

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Л. Р. Кильметова¹, С. Х. Хадиуллин², А. И. Дубин³,
Р. Р. Башаров⁴, И. П. Красников⁵

¹ kilmetovalr@gmail.com, ² salavathh@gmail.com, ³ alexey.dubin@rambler.ru, ⁴ 3rash@mail.ru, ⁵ krasnikovip@mail.ru

^{1,2,4,5} ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

³ ПАО «ОДК – Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО)

Поступила в редакцию 19.03.2020

Аннотация. При эксплуатации изделий, используемых в различных областях техники, а также многочисленными экспериментами отмечается, что остаточные напряжения влияют на износостойкость, коррозионную стойкость и долговечность деталей. Известно, что основными факторами возникновения остаточных напряжений являются различные виды обработки. В статье рассмотрено влияние элементов режимов резания на формирование и распространение остаточных напряжений при точении жаропрочного деформируемого сплава на никелевой основе ХН73МБТЮ. Была разработана методика проведения экспериментальных исследований. Установлено, что наибольшее влияние на глубину и характер распределения остаточных напряжений при точении жаропрочного материала ХН73МБТЮ оказывает подача режущего инструмента.

Ключевые слова: остаточные напряжения; режимы резания; поверхностный слой; жаропрочный сплав; методы определения остаточных напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение и повышение заданного эксплуатационного ресурса деталей – основная задача для конструкторов и технологов. При эксплуатации поверхностные слои оказываются наиболее нагруженными и подвергаются активному воздействию внешней среды, вследствие чего происходит их разрушение [3]. Одним из основных параметров качества поверхностного слоя являются остаточные напряжения. При действии эксплуатационных нагрузок поверхностный слой оказывается также в неблагоприятных условиях, поскольку рабочие напряжения накладываются с технологическими остаточными напряжениями. Это приводит к принципиальным изменениям напряженности в поверхностном слое, резко возрастают результирующие напряжения, действующие в процессе эксплуатации, полностью меня-

ется эпюра распределения напряжений по сечению детали. Появление остаточных напряжений связано с условиями изготовления деталей. Целесообразно технологический процесс изготовления деталей организовывать таким образом, чтобы на участках деталей, подвергающихся при эксплуатации наибольшей деформации, были созданы сжимающие остаточные напряжения, например с помощью термических, механических, термомеханических и специальных методов обработки [2]. Поэтому технологические процессы изготовления деталей (например, выбор и назначение элементов режимов резания) должны проектироваться таким образом, чтобы возникающие в поверхностном слое остаточные напряжения не оказывали отрицательного влияния на надежность работы деталей в заданных условиях эксплуатации.

Кроме того, несмотря на большое количество работ [4–8], в данной области нет определенных рекомендаций по назначению режимов резания с целью получения на поверхности детали напряжений сжатия. В связи с этим исследование влияния элементов режимов резания на возникновение остаточных напряжений представляется актуальной задачей.

Отличием данной работы от аналогичных является разработка практических рекомендаций по подбору режимов резания для обеспечения напряжений сжатия после механообработки.

ФАКТОРЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Факторами, вызывающими остаточные напряжения, выступают пластическая деформация при силовом воздействии и нагревание поверхностных слоев [9].

При резании под действием сил происходит деформирование и разрушение обрабатываемого материала, сопровождающееся рядом физико-химических явлений [10]:

- в деформированном объеме возникает сложнапряженное состояние материала, имеют место упругие и пластические деформации, происходит хрупкое и вязкое разрушение. На обработанной поверхности образуются шероховатости, текстура и структура поверхностного слоя детали, а также изменяются теплофизические и электрофизические свойства;

- в зоне резания возникает неоднородное температурное поле. Имеет место сложная схема распространения тепловых потоков, и создаются особые условия теплопередачи между инструментом, стружкой и поверхностным слоем детали;

- трение в области контакта инструмента и материала заготовки происходит при больших давлениях и температурах.

Все вышеперечисленные явления находятся в тесной взаимосвязи.

Знак, величина, характер эпюры этих напряжений определяются множеством технологических условий, но все они так или иначе изменяют два параметра – тепловой и силовой. В первом приближении можно принять, что преобладание того или

иного фактора (теплового или силового) и будет определять величину и знак остаточных напряжений. Общеизвестно также, что если в процессе обработки из-за высоких температур будут протекать термопластические деформации, то в поверхностном слое будут сформированы растягивающие напряжения. Условием протекания термопластических деформаций является достижение и превышение температурных напряжений $\sigma_{\text{терм}}$ предела текучести обрабатываемого материала [10].

Температурные зависимости (рис. 1) $\sigma_{\text{терм}}$ и $\sigma_{0,2}$ для сплава на никелевой основе (у данного сплава нет физического предела текучести, поэтому указано значение напряжения при деформации 0,2 %; при этом характеристика $\sigma_{0,2}$ найдена для упрочненного деформацией материала). Из рис. 1 следует, что пересечение кривых (равенство $\sigma_{\text{терм}}$ и $\sigma_{0,2}$) наблюдается при температуре 620 °С, именно начиная с этой температуры (температуры начала термопластических деформаций $\theta_{\text{т.д}}$) в поверхностном слое будут формироваться остаточные напряжения растяжения в осевом и тангенциальном направлениях. При всех условиях резания, при которых контактная температура не будет превышать $\theta_{\text{т.д}}$, в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения [10, 11].

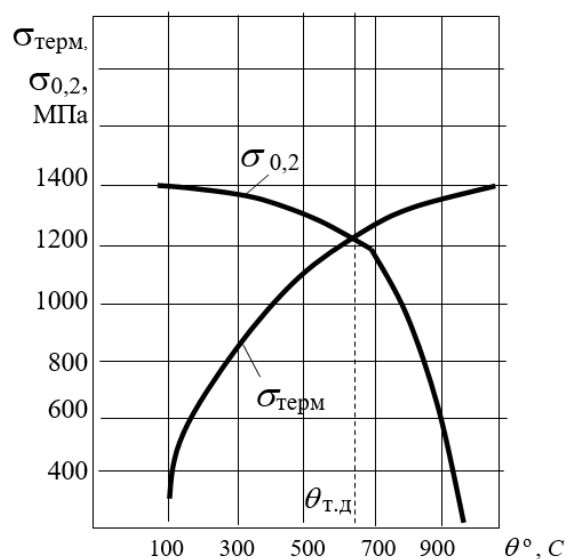


Рис. 1. Температурные зависимости $\sigma_{\text{терм}}$ и $\sigma_{0,2}$ для никелевого сплава ХН77ТЮР. Значения $\sigma_{0,2}$ даны для упрочненного деформацией сплава при испытании на сжатие [11]

Механизм образования остаточных напряжений (рис. 2) состоит в том, что при перемещении резца в направлении подачи S , вследствие трения между задней поверхностью инструмента и вновь образуемой поверхностью, верхние слои последней подвергаются пластической деформации растяжения, а слои металла, лежащие ниже, растягиваются упруго. После прохождения резца упруго растянутые внутренние слои стремятся вернуться в прежнее положение, но этому препятствуют верхние слои, претерпевшие необратимую пластическую деформацию. В результате верхние слои оказываются сжатыми, а внутренние – частично растянутыми [11–13].

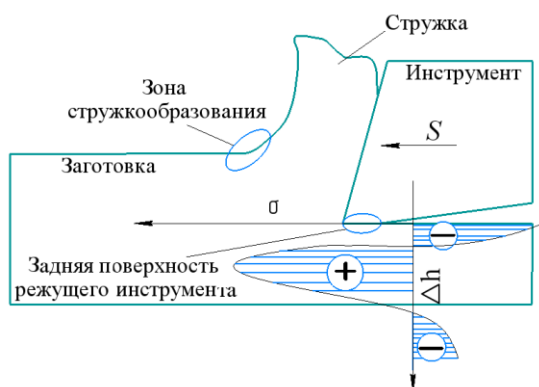


Рис. 2. Схема стружкообразования с формированием остаточных напряжений

Кроме того, на эксплуатационные характеристики деталей оказывают влияние геометрические параметры, такие как канавки, проточки, отверстия, являющиеся концентраторами напряжений, и вызывают появление микротрещин. Сложный профиль детали подразумевает появление концентраторов напряжений (рис. 3).

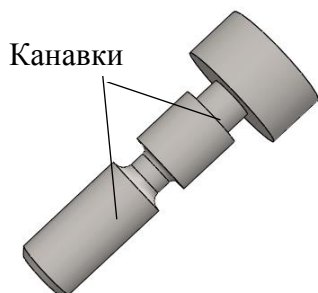


Рис. 3. Пример конструктивных особенностей детали

В связи с этим была разработана методика определения влияния элементов режимов резания на возникновение остаточных напряжений при точении канавки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве образцов были приняты заготовки в форме втулок (наружный диаметр – $\varnothing 28$ мм, внутренний – $\varnothing 20$ мм, длина – 65 мм) из жаропрочного деформируемого сплава на никелевой основе ХН73МБТЮ. Данный материал применяется для изготовления деталей авиационной техники (лопаток газовых турбин, термообработанных и обточенных штамповок дисков, дефлекторов, лабиринтов и носков) с рабочей температурой до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$; крепежных и других деталей, работающих при температуре до $750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Образцы были подвергнуты термообработке (рис. 4) с целью минимизации остаточных напряжений после предварительной обработки.



Рис. 4. Втулка, подвергнутая термообработке

Согласно технологии изготовления в качестве режущего инструмента использовали канавочный резец (рис. 5) с геометрическими параметрами $\lambda = 0^{\circ}$, $\gamma = 0^{\circ}$, $\alpha = 7^{\circ}$, $r = 1,5$ мм [14].

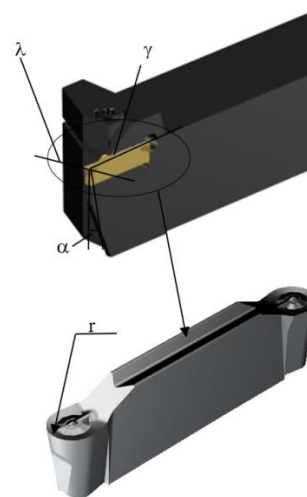


Рис. 5. Инструмент для обработки канавок

Материал пластины – твердая мелкозернистая вольфрамкобальтовая основа с 6 %-ным содержанием кобальта, обладающая повышенной красностойкостью и стойкостью к пластической деформации с покрытием TiAlN [14].

триангуляционный лазерный датчик. Состав ванны для травления подбирался с учетом химического состава и свойств исследуемого сплава. Плотность тока выбиралась с учетом необходимой скорости травления и ограничивалась допустимой температурой нагрева образца в электролите.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований были получены зависимости величины остаточных напряжений от глубины залегания при точении (рис. 10).

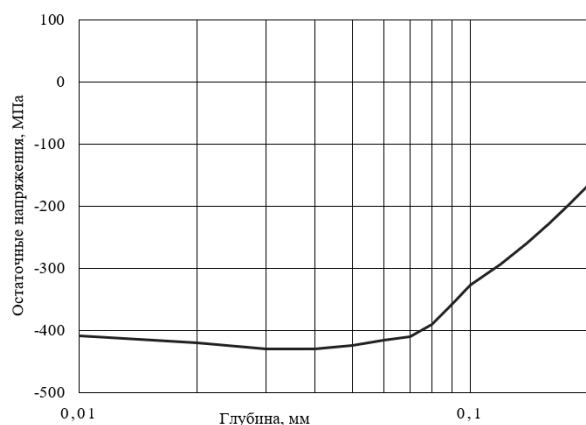


Рис. 10. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины залегания при точении:
 $V = 25$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об

Как видно из графика, на поверхности сформировались напряжения сжатия.

С каждым снимаемым слоем интенсивность увеличения остаточных напряжений остается практически неизменной до некоторого значения, а затем резко идет изменение уровня остаточных напряжений. Это связано с тем, что в процессе снятия нижележащих слоев напряжения стремятся к компенсации.

Аналогичные результаты были получены при различных скоростях резания (рис. 11).

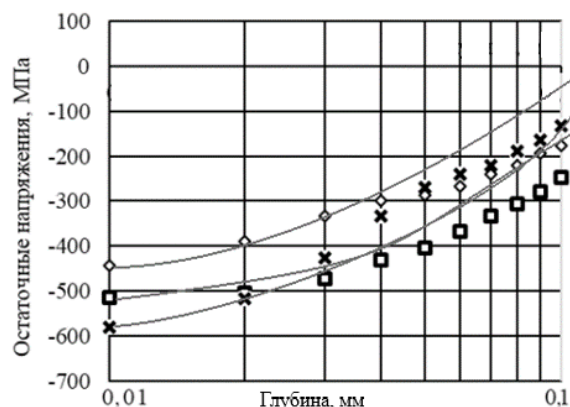


Рис. 11. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины залегания при точении ($S = 0,05$ мм/об): $x - V = 25$ м/мин; $\square - V = 30$ м/мин; $\diamond - V = 40$ м/мин

Согласно полученным зависимостям при увеличении скорости резания начальный уровень остаточных напряжений незначителен. Причем среднее значение напряжений соответствует скорости резания, используемой в технологии.

Аналогичные результаты были получены при различных подачах режущего инструмента (рис. 12).

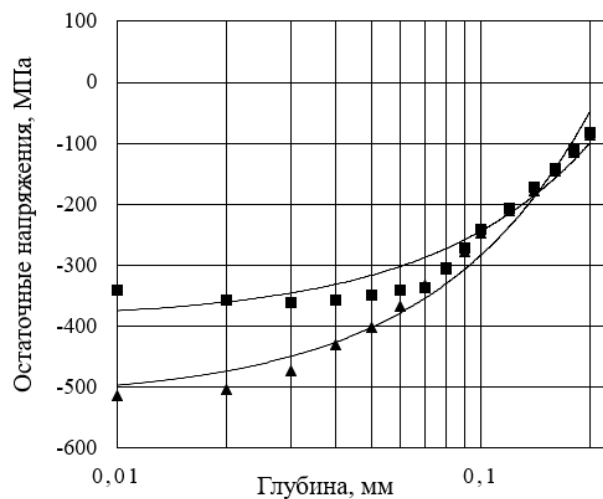


Рис. 12. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины залегания при точении со скоростью $V = 25$ м/мин: $\Delta - S = 0,05$ мм/об; $\square - S = 0,1$ мм/об

Зависимость значений напряжений и глубины залегания имеет более интенсивный характер по сравнению с изменением скорости резания. Это объясняется тем, что тепло, образующееся в процессе резания, не аккумулируется в местах его образования, а распространяется от точек с более высокой температурой к точкам с низкой температурой. Из зоны резания тепло уносится со стружкой.

Таким образом, установлено, что доминирующим фактором образования на поверхности детали напряжений сжатия является пластическая деформация.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выявлено, что для обеспечения наведения остаточных напряжений при точении жаропрочного сплава ХН73МБТЮ необходимо уменьшать подачу режущего инструмента.

Влияние скорости на формирование остаточных напряжений неоднородно вследствие взаимного влияния пластической деформации и физико-механических превращений.

Результаты проведенных экспериментов неоднозначны из-за малого диапазона варьирования факторов эксперимента (скорости и подачи), требуются дополнительные исследования влияния элементов режимов резания с привлечением других методов определения уровня остаточных напряжений, таких как компьютерное моделирование, рентгеноструктурный и др. методы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смыслов А. М., Смыслова М. К., Дубин А. И.** О взаимосвязи релаксационной стойкости лопаток компрессора из титановых сплавов с параметрами сопротивления усталости // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 1 (46). С. 24–29. [A. M. Smyslov, M. K. Smyslova, A. I. Dubin, "On the relationship of the relaxation stability of titanium alloy compressor blades with fatigue resistance parameters", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 1 (46), pp. 24-29, 2012.]
2. **Тополянский П. А.** Влияние финишного плазменного упрочнения на остаточные напряжения поверхностного слоя инструментальных материалов. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки // Материалы 7-й Международной практической конференции-выставки (г. Санкт-Петербург, Апр. 12–15 2005). СПб.: СПбПУ, 2005. С. 334–340. [P. A. Topolyansky, "The effect of finish plasma hardening on the residual stresses of the surface layer of instrumental materials. Technologies

for repair, restoration and hardening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological equipment", in *Materials of the 7th International Practical Conference-Exhibition*, 2005, pp. 334-340.]

3. **Резание** материалов. Режущий инструмент / В. М. Кишуров и др. М.: Машиностроение, 2009. 492 с. [V. M. Kishurov, et. al., *Cutting materials. Cutting tool*, (in Russian). Moscow, 2009.]

4. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1997. 278 с. [A. D. Makarov, *Optimization of cutting processes*, (in Russian). Moscow: Engineering, 1997.]

5. **Безъязычный В. Ф., Фоменко Р. Н.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД // Металлообработка. 2017. № 1. С. 16–22. [V. F. Bezzyazchny, R. N. Fomenko, "Technological support of operational properties of gas turbine engine parts", (in Russian), in *Metalloobrabotka*, no. 1, pp. 16-22, 2017.]

6. **Подзей А. В., Сулима А. Н., Евстигнеев М. И.** Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с. [A. V. Podzey, A. N. Sulima, M. I. Evstigneev, *Technological residual stresses*, (in Russian). Moscow: Engineering, 1973.]

7. **Henriksen E. K.** Residual Stresses in Machined Surfaces // American Society of Mechanical Engineers. 1951. № 73 (1). Pp. 69-76. [E. K. Henriksen, "Residual Stresses in Machined Surfaces", in *American Society of Mechanical Engineers*, no. 73 (1), pp. 69-76, 1951.]

8. **Xie Q.** A Study on Residual Stresses and Tool Wear Induced by the Machining Process. in NAMRC XVII. 1989: SME. [Q. Xie, "A Study on Residual Stresses and Tool Wear Induced by the Machining Process", in *NAMRC XVII*, 1989.]

9. **Анализ** причин и источников возникновения остаточных напряжений / Р. Р. Башаров и др. // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22, № 4 (82). С. 3–11. [R. R. Basharov, et. al., "Analysis of causes and sources of residual stresses", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 22, no. 4 (82), pp. 3-11, 2018.]

10. **Буркин С. П.** Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2015. С. 12 [S. P. Burkin, *Residual Stresses in Metal Modification*, (in Russian). Yekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2015.]

11. **Мухин В. С.** Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД. М.: Наука, 2005. 295 с. [V. S. Mukhin, *Surface. Technological aspects of the strength of parts of the GTE*, (in Russian). Moscow: Nauka, 2005.]

12. **Кузнецова Е. В., Вавель А. Ю.** Параметры процесса механической обработки с учетом температурных режимов // Вестник ПНИПУ. 2013. № 1. С. 136–147. [E. V. Kuznesova, A. Yu. Vavel, "The parameters of the machining process taking into account temperature conditions", (in Russian), in *Vestnik PNRPU*, no. 1, pp. 136-147, 2013.]

13. **Васькин К. Я.** Расчет остаточных напряжений при точении поверхности с износостойкими покрытиями // Вектор науки ТГУ. 2012. № 3 (21). С. 60–65. [K. Ya. Vaskin, "The calculation of residual stresses in turning of the surface with wear-resistant coatings", (in Russian), in *Vector nauki TGU*, no. 3 (21), pp. 60-65, 2012.]

14. **Официальный сайт** компании Сандвик [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/productdetails.aspx?c=n123f2-0300-ro%201105> (дата обращения 20.03.2020). [The official site of the company Sandvik (2020, Mar. 20) [Online], (in Russian).

Available: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/productdetails.aspx?c=n123f2-0300-ro%201105>]

15. **Балашов В. М., Мешков В. В., Схиртладзе А. Г.** Обработка резанием в машиностроении. Тверь: ТвГТУ, 2004. 174 с. [V. M. Balashov, V. V. Meshkov, A. G. Shirtladze, *Machining Cutting*, (in Russian). Tver': TvGTU, 2004.]

16. **Григорьев С. Н.** Резание материалов. Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. 628 с. [S. N. Grigoryev, *Material cutting*, (in Russian). Penza: Izd-vo PGU, 2010.]

17. **Овсенко Е. С.** Обеспечение качества изготовления маложестких деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 144 с. [E. S. Ovseenco, *Ensuring the quality of manufacturing low-density parts such as disks of gas turbine plants by reducing technological residual deformations*: PhD. Moscow, 2011. 144 p.]

ОБ АВТОРАХ

КИЛЬМЕТОВА Лилия Римовна, асп. каф. АТП. Дипл. инженер (УГАТУ, 2013). Готовит дис. о способах контролируемого наведения остаточных напряжений.

ХАДИУЛЛИН Салават Хакимович, доц. каф. АТП. Дипл. инженер (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. термодинамических процессов, синергетики, компьютерного моделирования процессов резания, мехатроники.

ДУБИН Алексей Иванович, начальник лаборатории ПАО «ОДК-УМПО». Дипл. инж.-технол. (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по динамике и прочности машин (СГАУ, 2015). Иссл. в обл. релакс. стойкости и остат. поверхн. напряжений.

БАШАРОВ Рашит Рамилович, инженер каф. АТП. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. высокоскоростной обработки.

КРАСНИКОВ Илья Петрович, маг. каф. АТП. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2018). Иссл. в обл. механообработки сложнопрофильных тонкостенных изделий.

METADATA

Title: Effect of cutting conditions on the formation of residual stresses on turning super alloys.

Authors: L. R. Kilmetova¹, S. Kh. Khadiullin², A. I. Dubin³, R. R. Basharov⁴, I. P. Krasnikov⁵

Affiliation:

^{1,2,4,5} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

³ Ufa Engine Industrial Association (UMPO), Russia.

Email: ¹kilmetovalr@gmail.com, ²salavathh@gmail.com, ³alexey.dubin@rambler.ru, ⁴zrash@mail.ru, ⁵krasnikovip@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 2 (88), pp. 29-35, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: During the operation of products used in various fields of technology, as well as numerous experiments, it is noted that residual stresses affect the wear resistance, corrosion resistance and durability of parts. It is known that the main factors in the occurrence of residual stresses are various types of processing. The article considers the

influence of elements of cutting conditions on the formation and distribution of residual stresses during turning of a heat-resistant deformable alloy based on nickel based HN73MBTY. A methodology for conducting experimental studies was developed. It was found that the greatest influence on the depth and nature of the distribution of residual stresses when turning heat-resistant material HN73MBTY has the supply of a cutting tool.

Key words: residual stresses; cutting conditions; surface layer; heat-resistant alloy; methods for determining residual stresses.

About authors:

KILMETOVA, Liliia Rimovna, Postgrad. Student, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2013).

KHADIULLIN, Salavat Khakimovich, PhD, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2005).

DUBIN, Aleksey Ivanovich, Head of laboratory PJС «UEC-UMPO». Dipl. engineer-technol. (UGATU, 2000). Cand. of Tech. Sci. in dynamics and strength of machines (SGAU, 2015). Investigation of relaxational resistance and surface residual stresses.

BASHAROV, Rashit Ramilovich, PhD, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2008).

KRASNIKOV, Ilya Petrovich, Magister. (MSC) Student, Dept. Technological process automation. Baccalaureate (USATU, 2018).