

УДК 621.77, 539.3

Е.В. Кузнецова, А.Ю. Вавель

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ**

В работе рассмотрены основные процессы механической обработки и их влияние на прочность цилиндрических изделий, рассчитаны температурные режимы при резании труб, параметры процесса резания выбраны с учетом величины и знака температурных остаточных напряжений. Под механической обработкой понимают различные виды резания: точение, сверление, фрезерование, шлифование, хонингование, полирование. В связи с этим показано, как процессы механической обработки влияют на качество трубных изделий. Целью обработки резанием является придание деталям желаемой формы. Также рассмотрены параметры процесса резания, выбранные с учетом величины и знака температурных остаточных напряжений. Остаточные напряжения при резании металлов образуются в результате неравномерности пластической деформации и значительного нагрева поверхностных слоев. Решая задачу термоупругости, можно определить напряжения, возникающие при нагреве. Исходя из условия не наступления пластических деформаций на поверхности детали после прохождения инструмента можно оптимизировать параметры резания при обработке различных осесимметричных металлоизделий. Таким образом, зная соотношения между этими параметрами, а также механические свойства материала заготовки и геометрию, можно оценить величину интенсивности напряжений в зависимости от начальной температуры и параметров резания при обработке трубы. Далее, на основе полученных результатов построены соотношения и зависимости важнейших параметров резания для трубных изделий из различных материалов и представлены предельные соотношения параметров механической обработки трубы. В работе предложена методика определения предельных соотношений параметров процесса резания для осесимметричных изделий с учетом температурного разогрева поверхности за счет трения при обточке. Методика позволяет определять напряжения на поверхности заготовки и рационально подбирать параметры процесса в зависимости от геометрии детали и обрабатываемого материала.

Ключевые слова: температурные напряжения, осесимметричные цилиндрические детали, температура контакта, скорость резания, подача, интенсивность остаточных напряжений.

E.V. Kuznetsova, A.J. VavelPerm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation**PARAMETERS OF PROCESS OF MACHINING
INTO ACCOUNT TEMPERATURE MODES**

In work the basic processes of machining and their influence on quality and durability of cylindrical products, calculated temperature modes are considered at cutting of pipes, parameters of process of cutting are chosen taking into account size and a sign on temperature residual stresses. By machining

understand different types of cutting: turning, drilling, milling, grinding, honing, polishing. In this regard, shows how the processes of machining affect the quality of tubular products. The aim is to give a cutting detail desired shape. Also examined parameters of the cutting process, selected to the value and sign of thermal residual stresses. Residual stresses in metal cutting result from uneven plastic deformation and significant heating of the surface layers. Solving the problem of thermoelasticity can determine the stresses induced by heating. Based on the terms of the onset of plastic deformation is not on the surface of the part after passing through the tool, you can optimize the cutting parameters for the treatment of various axisymmetric metal. Thus, knowing the relationship between these parameters and the mechanical properties of the workpiece material and geometry can estimate the stress intensity as a function of the initial temperature and cutting data processing tube. Then based on the results built relationships and dependencies critical cutting parameters for tubular products of different materials and some limiting parameter ratios machining tube. The paper presents the method of determination of the limit relations parameters of the cutting process for axisymmetric products with temperature heating surface due to friction when turning. The method allows to determine the voltage at the surface of the workpiece and the rational selection of the process parameters, depending on the part geometry and the material.

Keywords: Temperature tension, axisymmetric cylindrical details, contact temperature, speed of cutting, giving, intensity of residual stresses.

Существуют определенные закономерности технологических процессов обработки резанием, не зависящие от форм заготовок. В работе [1] описана последовательность механической обработки, когда исходную заготовку сначала обрабатывают начерно (обдирают). Если необходимо, заготовка перед точной (окончательной) обработкой проходит промежуточную (не механическую) операцию. В таком случае за предварительной обработкой следует термообработка (улучшение, закалка, отпуск) и затем окончательная обработка.

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

– 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. Иногда возникает особый вид трения неокисленных поверхностей – чистое трение.

Все перечисленные явления находятся в тесной взаимозависимости. Для повышения производительности и экономичности различных видов механической обработки необходимо иметь четкое представление обо всех физико-химических явлениях.

Важными характеристиками физического состояния поверхностного слоя являются величина и знак остаточных напряжений. Имеющиеся в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения обычно повышают предел выносливости деталей, а остаточные напряжения растяжения понижают его. Для сталей, обладающих высокой твердостью, усталостная прочность повышается в результате действия сжимающих напряжений на 50 %, а за счет растягивающих напряжений снижается на ~30 % [2].

Остаточные напряжения при резании металлов образуются в результате неравномерности пластической деформации и значительного нагрева поверхностных слоев. Кроме того, при высоких температурах резания могут происходить структурные превращения. Сущность образования остаточных напряжений состоит в следующем. После прохода резца упругорастянутые слои стремятся сжаться, но этому препятствуют верхние слои, претерпевшие необратимую пластическую деформацию. В результате внутренние слои останутся частично растянутыми, а в верхнем слое возникнут остаточные напряжения.

Под действием второго фактора – нагрева теплом, идущим в деталь, – верхние слои стремятся удлиниться, но этому оказывают сопротивление нижние более холодные, и в поверхностном слое появляются напряжения сжатия. При достаточно интенсивном нагреве эти напряжения могут превзойти предел текучести, и поверхностные слои окажутся пластически сжатыми. При охлаждении во внутренних слоях возникают остаточные напряжения сжатия, а на поверхности – напряжения растяжения. Результирующая эпюра остаточных напряжений зависит от интенсивности действия механического и теплового факторов.

Характер и величина остаточных напряжений зависят от условий обтекания деформируемым металлом вершины режущего инструмента. При работе в зоне наростообразования на величину и характер эпюры остаточных напряжений влияют размеры нароста и форма его вершины. Остаточные напряжения сжатия в тончайшем поверхностном слое глубиной в несколько десятых миллиметра [2] зависят от условий трения металла о заднюю поверхность, а растягивающие напря-

жения – от условий течения металла при переходе его в поверхностный слой. При повышении скорости резания остаточные напряжения растяжения уменьшаются и могут менять знак; аналогичный эффект вызывает уменьшение переднего угла γ . Остаточные напряжения растут при увеличении толщины срезаемого слоя. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое увеличиваются при переходе от обработки сталей с малым содержанием углерода и слабо воспринимающих закалку к высокоуглеродистым и высоколегированным сталям, хорошо воспринимающим закалку.

П.А. Ребиндер и Г.И. Елифанов экспериментально установили, что при резании конструкционных материалов более 99,5 % работы резания переходит в тепло [3]. Законы теплообразования объясняют ряд явлений, связанных с нагрузкой резца, его стойкостью, качеством обработанной поверхности.

Необходимо отметить, что в действительности в теплоту обращается не вся работа резания: небольшая часть ее переходит в потенциальную энергию искаженной кристаллической решетки. В обычных расчетах этой потерей пренебрегают [4].

Одной из причин появления напряжений в теле является неравномерный нагрев. С увеличением температуры элементы тела расширяются. Такое расширение в сплошном теле обычно не может происходить свободно, и вследствие нагрева возникают напряжения.

В работе [5] решена задача термоупругости для цилиндрических деталей. Найдены выражения для определения радиальных и осевых напряжений, возникающих под влиянием температуры для цилиндра с концентрическим круглым отверстием радиусом a и внешним радиусом b .

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr - \int_a^r T r dr \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr + \int_a^r T r dr - T r^2 \right), \\ \sigma_z &= \frac{\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b T r dr - T \right),\end{aligned}\tag{1}$$

где a – коэффициент линейного расширения материала; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; r – текущий радиус.

Полагаем, что за счет действия сил внешнего трения в зоне деформации распределение температуры по сечению детали описывается экспоненциальной зависимостью вида $T = T_0 e^{\frac{\beta r}{R}}$ [6].

Обозначив температуру поверхности детали через $T_1 = T_k$, из условия $T_{r=R} = T_1$ найдем показатель β и получим температурную функцию, соответствующую контактному разогреву детали в процессе обработки резанием,

$$T = T_0 \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{r/R}. \quad (2)$$

В настоящее время многие исследования посвящены определению зависимости температуры контакта, температурного разогрева от различных параметров механической обработки. А.М. Даниелян [6] путем математической обработки опытных данных выводит общую формулу зависимости температуры резания Θ при точении стали 40ХН быстрорежущим резцом от различных факторов:

$$Q = \frac{C_\theta v^{0,4} s^{0,24} t^{0,105} (\sin \varphi)^{0,26}}{k^{0,086} r^{0,11} F^{0,056}}. \quad (3)$$

Здесь r – радиус закругления вершины резца; $k = t/s$; F – площадь поперечного сечения резца; v – скорость резания, м/мин; s – подача за один оборот, мм/об.; t – глубина резания, мм; φ – главный угол в плане; C_θ – постоянная, зависящая от обрабатываемого материала и инструмента.

Тогда в соответствии с выражением (3) температура T_k контактного слоя определяется условиями резания и теплофизическими свойствами обрабатываемого материала:

$$T_k = T_0 + \frac{C_\theta v^{0,4} s^{0,24} t^{0,1} (\sin \varphi)^{0,26}}{K^{0,035} r^{0,11} F^{0,056}}, \quad (4)$$

где T_0 – температура центральных слоев детали.

Решая задачу термоупругости, можно определить напряжения, возникающие при нагреве. И далее из условия предотвращения пластических деформаций на поверхности детали после прохождения ин-

струмента определить рациональные соотношения параметров механической обработки.

Подставляя зависимость (2) в соотношения (1), после интегрирования и преобразований выражения для напряжений приведем к следующему виду:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\alpha E T_0}{(1-\mu)r^2} \left(\left(\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \right) J - \frac{rb\Delta T^{r/b}}{\ln \Delta T} + \frac{ab\Delta T^{r/b}}{\ln \Delta T} + \frac{b^2\Delta T^{r/b}}{\ln^2 \Delta T} + \frac{b^2\Delta T^{a/b}}{\ln^2 \Delta T} \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha E T_0}{(1-\mu)r^2} \left(\left(\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) J + \frac{rb\Delta T^{r/b}}{\ln \Delta T} - \frac{ab\Delta T^{r/b}}{\ln \Delta T} - \frac{b^2\Delta T^{r/b}}{\ln^2 \Delta T} + \frac{b^2\Delta T^{a/b}}{\ln^2 \Delta T} - \Delta T^{r/b} r^2 \right), \\ \sigma_z &= \frac{\alpha E T_0}{1-\mu} \left(\left(\frac{2}{b^2 - a^2} \right) J - \Delta T^{r/b} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta T = \frac{T_1}{T_0}$; $J = \frac{b^2\Delta T^{r/b}}{\ln \Delta T} - \frac{ab\Delta T^{r/b}}{\ln \Delta T} - \frac{b^2\Delta T}{\ln^2 \Delta T} + \frac{b^2\Delta T^{a/b}}{\ln^2 \Delta T}$.

Выражения (5) характеризуют распределения радиальных, окружных и продольных температурных напряжений по сечению трубы. На рис.1 показаны значения температурных напряжений для стальной трубы при $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹, нагреве 295 °С в зависимости от величины стенки трубы.

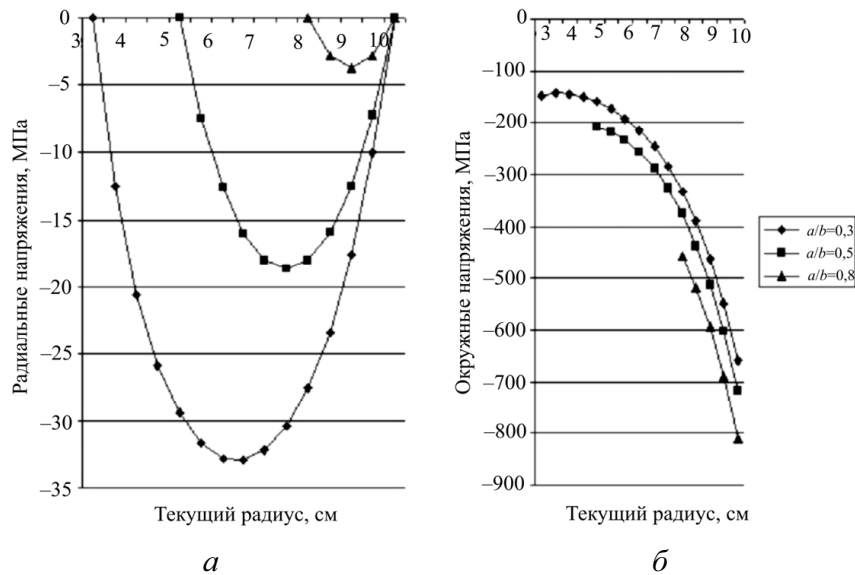


Рис. 1. Значения радиальных (а), окружных (б) напряжений при резании труб с разной относительной толщиной стенки

Результаты расчета показали, что толщина стенки трубы существенно влияет на величину напряжений. С утонением трубы окружные

и продольные напряжения сжатия растут, а радиальные уменьшаются. Радиальные напряжения на поверхности равны нулю.

Появлению остаточных напряжений в поверхностных слоях детали предшествует их переход в пластическое состояние. Для оценки этого перехода используем критерий удельной энергии формоизменения [7]

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \leq \sigma_T, \quad (6)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_T – предел текучести обрабатываемого металла.

Таким образом, зная соотношения между этими параметрами, а также механические свойства материала заготовки и геометрию, можно оценить величину интенсивности напряжений в зависимости от начальной температуры и параметров резания при обработке трубы.

На рис. 2 показано распределение интенсивности температурных напряжений в трубной стальной заготовке с внешним радиусом 10 см с толщиной стенки 5 см, при $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, $\alpha = 1,1 \cdot 10^5$ град⁻¹.

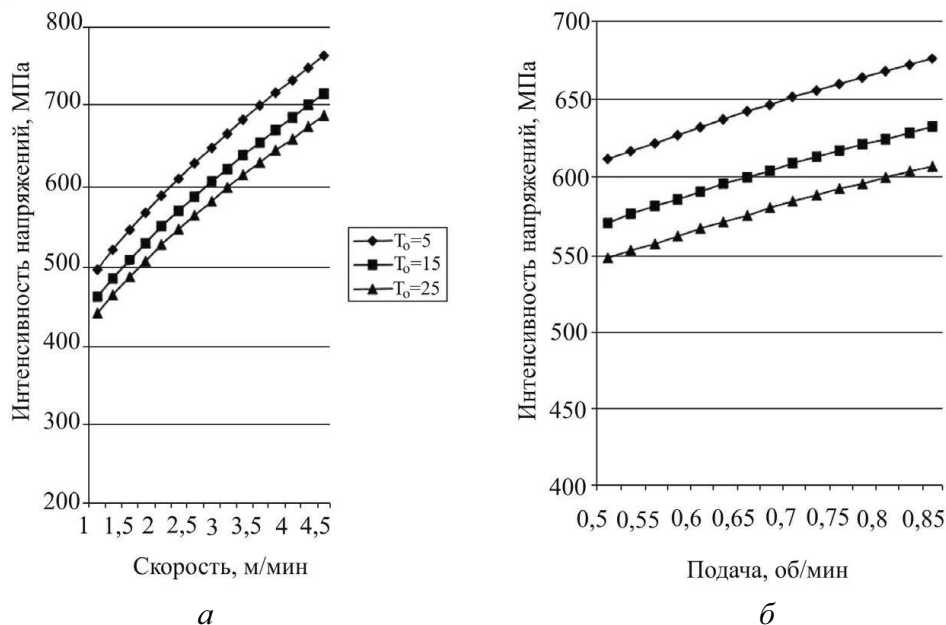


Рис. 2. Величина интенсивности напряжений для трубы в зависимости от начальной температуры и параметров резания: а – скорости, б – подачи

Из распределений видно, что интенсивность напряжений возрастает с уменьшением начальной температуры, значения колеблются от 600–760 МПа. Скорость резания сильно влияет на распределение ин-

тенсивности. При увеличении скорости от 1–5,5 м/мин интенсивность в среднем возрастает на 300 МПа. Подача менее существенно влияет на изменения напряжений. При толщине срезаемого слоя от 0,5–5 мм, что соответствует уменьшению детали от 3–33,3 %, повышается интенсивность напряжений. При увеличении разницы температур ΔT (начальной и температуры контакта) интенсивность напряжений возрастает.

Решая задачу термоупругости, можно определить напряжения, возникающие при нагреве [8]. И далее из условия предотвращения пластических деформаций на поверхности детали после прохождения инструмента определить рациональные соотношения параметров механической обработки.

Численный анализ соотношений (5) говорит о том, что наибольшие температурные напряжения возникают в поверхностных слоях детали $R/r=1$.

Для поверхности трубной заготовки запишем температурные напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_r |_{r=b} &= 0, \\ \sigma_\theta |_{r=b} &= \sigma_z |_{r=b}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sigma_\theta |_{r=b} = \frac{\alpha E T}{1-\mu} \left(\frac{2}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2 \Delta T}{\ln \Delta T} - \frac{ab \Delta T}{\ln \Delta T} - \frac{b^2 \Delta T}{\ln^2 \Delta T} + \frac{b^2 \Delta T^{a/b}}{\ln^2 \Delta T} \right) - \Delta T \right).$$

Тогда для трубы интенсивность напряжений будем определять следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{\alpha E T_0}{1-\mu} \left(\frac{2}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2 \Delta T}{\ln \Delta T} - \frac{ab \Delta T}{\ln \Delta T} - \frac{b^2 \Delta T}{\ln^2 \Delta T} + \frac{b^2 \Delta T^{a/b}}{\ln^2 \Delta T} \right) - \Delta T \right). \quad (8)$$

В соотношения (8) входит температурная функция, которая зависит от температуры контакта, которая, в свою очередь, зависит от многих факторов, влияющих на температуру, поэтому удобна при анализе процессов резания; для практических целей обычно пользуются более простыми формулами [9].

В порядке упрощения исключим из формулы влияние φ , r и F , считая их постоянными величинами для данного резца. Кроме того, учитывая наличие в формуле s и t , также исключим из нее влияние отношения глубины резания к подаче K .

После этих упрощений формула примет вид

$$T_k = T_0 + C_\theta v^{0,4} s^{0,24} t^{0,1}. \quad (9)$$

На основании математической обработки было получено для постоянного коэффициента C_θ значение 148,8. Таким образом, окончательно будем иметь

$$T_k = T_0 + 148,8 v^{0,4} s^{0,24} t^{0,1}. \quad (10)$$

Поэтому исходя из условия ненаступления пластических деформаций на поверхности детали после прохождения инструмента можно оптимизировать параметры резания при обработке различных осесимметричных металлоизделий.

Таким образом, зная соотношения между этими параметрами, а также механические свойства материала заготовки и геометрию, можно оценить величину интенсивности напряжений в зависимости от начальной температуры и параметров резания при обработке трубы.

Далее на основе полученных результатов построены соотношения и зависимости важнейших параметров резания для трубных изделий из различных материалов.

Ниже представлены предельные соотношения параметров механической обработки трубы с внешним радиусом 10 см и толщиной стенки 5 см (рис. 3) при начальной температуре $T_0=30^\circ\text{C}$,

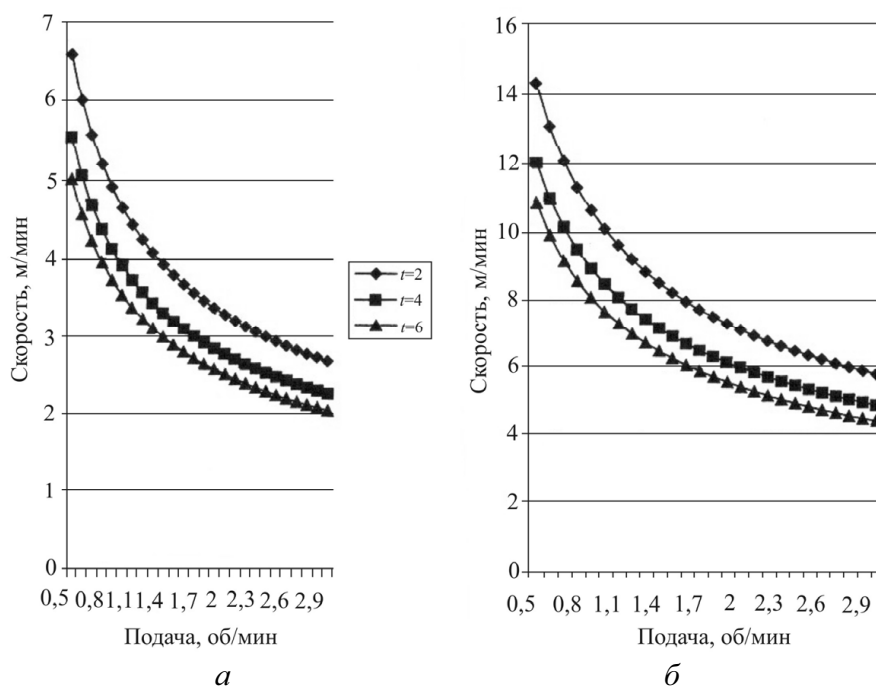


Рис. 3. Предельные соотношения параметров механической обработки трубы: а – сталь 3; б – 40X2H4

Таким образом, предложена методика определения предельных соотношений параметров процесса резания для осесимметричных изделий с учетом температурного разогрева поверхности за счет трения при обточке. Данная методика позволяет определять напряжения на поверхности заготовки и рационально подбирать параметры процесса в зависимости от геометрии детали и обрабатываемого материала

Библиографический список

1. Шпур Г., Штеферле Т. Справочник по технологии резания материалов. – М.: Машиностроение, 1985.
2. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Metallurgia, 1989. – С. 254.
3. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки / В.А. Кривоухов, П.Г. Петруха, Б.Е. Бруштейн, С.В. Егоров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1974. – 616 с.
4. Даниелян А.М. Тепловой баланс при резании металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975.
6. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1954.
7. Кузнецова Е.В., Лядова Ю.А., Пустозерова Е.В. Температурные режимы механической обработки осесимметричных металлоизделий // Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин. – Пермь, 2005. – № 5.
8. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Kosheleva N.A., Chernova T.V. Temperature conditions and models of formation of residual stresses in wiredrawing // Russian Journal of non ferrous metals. – 2011. – Vol 52. – No. 3. – P. 227–229,
9. Фещенко В.Н., Махмутов Р.Х. Токарная обработка. – М.: Высшая школа, 2005. – 303 с.

References

1. Shpur G., Shteferle T. Spravochnik po texnologii rezaniya materialov [Reference material for cutting technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1985.
2. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallax i splavax [Control of residual stresses in metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1989, p. 254.

3. Krivoukhov V.A., Petrukha P.G., Brushtejn B.E., Egorov S.V. [et al.] Rezanie konstrukcionnykh materialov, rezhushhie instrumenty i stanki [Cutting of structural materials, cutting tools and machine tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 616 p.

4. Danielyan A.M. Teplovoj balans pri rezanii metallov [Heat balance in metal cutting]. Moscow: Akademija nauk SSSR, 1955.

5. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1975.

6. Danielyan A.M. Teplota i iznos instrumentov v processe rezaniya metallov [Heat and tool wear in metal cutting]. Moscow: Mashgiz, 1954.

7. Kuznecova E.V., Lyadova Yu.A., Pustozeroва E.V. Temperaturnye rezhimy mexanicheskoy obrabotki osesimmetrichnykh metalloizdelij [Temperature regimes of axisymmetric metal machining]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Dinamika i prochnost' mashin*, 2005, no. 5.

8. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Kosheleva N.A., Chernova T.V. Temperature conditions and models of formation of residual stresses in wiredrawing. *Russian Journal of non ferrous metals*, 2011, vol. 52, no. 3, pp. 227-229.

9. Feshhenko V.N., Maxmutov R.X. Tokarnaya obrabotka [Turning]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 303 p.

Об авторах

Кузнецова Елена Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры динамики и прочности машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mellen75@mail.ru).

Вавель Алла Юрьевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры динамики и прочности машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Alla281@ya.ru).

About the authors

Kuznetcova Elena Vladimirovna (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate professor, Deputy dean, Department of Dynamic and strength of mechanism, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: mellen75@mail.ru).

Vavel Alla Yurevna (Perm, Russian Federation) – post-graduate student of Department of Dynamic and strength of mechanism, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: Alla281@ya.ru).

Получено 15.02.2013