

Определение уровня остаточных напряжений методом компьютерного моделирования при точении жаропрочных материалов

Л.Р. Кильметова✉

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Российская Федерация

✉kilmetovalr@gmail.com

Резюме

Одним из факторов качества обработанной поверхности являются остаточные напряжения, возникающие после механической обработки, которые имеют важное значение для долговечности и надежности конструкций и изделий. В связи с этим актуальность определения таких остаточных напряжений становится все более важной задачей. Остаточные напряжения необходимо учитывать при проектировании и изготовлении изделий. Определение уровня напряжений и их распределения в материале помогает предотвратить возникновение проблем и повреждений при эксплуатации продукции, а также оптимизировать процессы обработки и повысить ее качество и надежность. Существуют различные методы для измерения и снятия остаточных напряжений, такие как механический, рентгеноструктурный, акустический и др. Все они имеют свои достоинства и недостатки, и выбор метода зависит от конкретных требований и условий. Однако отсутствует способ, позволяющий на стадии технологического проектирования изделия прогнозировать допустимый уровень остаточных напряжений. В данной статье предложена и описана методика, основанная на использовании компьютерного моделирования, которая помогает прогнозировать и контролировать уровень и величину остаточных напряжений еще на стадии технологической подготовки производства. Применение компьютерного моделирования совместно с данными о материалах и процессе обработки дает возможность точно настроить параметры обработки, чтобы достичь желаемого уровня и знака остаточных напряжений, что повысит эффективность производства и снизит вероятность дефектов продукции.

Ключевые слова

остаточные напряжения, режимы резания, компьютерная модель, жаропрочные материалы, деформация, разрушение

Для цитирования

Кильметова Л.Р. Определение уровня остаточных напряжений методом компьютерного моделирования при точении жаропрочных материалов / Л.Р. Кильметова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 22–33. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).22-33.

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.09.2023 г.; поступила после рецензирования: 27.09.2023 г.; принята к публикации: 27.09.2023 г.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упругости деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

Determining the level of residual stresses by computer simulation in turning heat-resistant materials

L.R. Kil'metova✉

Ufa University of Science and Technology, Ufa, the Russian Federation

✉kilmetovalr@gmail.com

Abstract

One of the factors of the quality of the machined surface is the residual stresses arising after machining, which are important for the durability and reliability of structures and products. In this regard, the relevance of determining residual stresses, especially after machining, is becoming an increasingly important task. Residual stresses must be taken into account when designing and manufacturing products. Measuring residual stresses allows to determine their level and distribution in the material, which helps prevent problems and damage during operation, it also allows to optimize processing processes and improve the quality and reliability of products. There are various methods for measuring and relieving residual stresses, such as mechanical, X-ray diffraction, acoustic and others. They all have their advantages and disadvantages, and the choice of method depends on the specific requirements and conditions. However, there is no way to predict the required level of residual stresses at the stage of technological design of a product. This article proposes and describes a technique based on the use of computer modeling, which allows to predict and control the level and magnitude of residual stresses even at the stage of technological preparation for production. The use of computer simulation in conjunction with material and processing data makes it possible to fine-tune processing parameters

to achieve the desired level and sign of residual stresses, which will increase production efficiency and reduce the likelihood of product defects.

Keywords

residual stresses, cutting conditions, computer model, heat-resistant materials, deformation, destruction

For citation

Kil'metova L.R. Opredelenie urovnya ostatochnykh napryazhenii metodom komp'yuternogo modelirovaniya pri tochenii zharo-prochnykh materialov [Determining the level of residual stresses by computer simulation in turning heat-resistant materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 22–33. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).22-33.

Article Info

Received: September 25, 2023; Revised: September 27, 2023; Accepted: September 27, 2023.

Acknowledgement

The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State task «Research of physico-chemical and mechanical processes in the shaping and hardening of parts for aerospace and transport equipment» No FEUE-2023-0006.

Введение

В современном мире жаропрочные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, включая энергетику, авиацию и транспорт. При механической обработке этих материалов образуются остаточные напряжения, которые могут негативно сказаться на качестве обработанной поверхности и прочности конечных изделий. Остаточные напряжения могут привести к деформациям, трещинам и растяжениям материалов, что приводит к сокращению жизненного цикла изделий и повышению вероятности их выхода из строя [1–3].

Появление остаточных напряжений связано с условиями изготовления деталей, поэтому технологические процессы их производства должны проектироваться так, чтобы возникающие в поверхностных слоях остаточные напряжения гарантировали надежность работы деталей в заданных условиях эксплуатации. Как известно остаточные напряжения бывают двух видов: растягивающие и сжимающие. Растягивающие остаточные напряжения могут вызывать деформацию, трещины в материале, что приводит к разрушению или снижению механических свойств обработанной детали.

На формирование этих остаточных напряжений оказывают влияние такие причины как пластическая деформация, локализованный нагрев и фазовые превращения поверхностных слоев изделия [4].

Кроме того, измерение и контроль остаточных напряжений после механической обработки становится все более важной задачей в связи с возникновением технических сложностей

из-за конструкционных особенностей деталей либо вследствие необходимости разрушения готового изделия.

На данный момент существует множество методов измерения остаточных напряжений: метод рентгеноструктурного анализа, механический, акустический, метод компьютерного моделирования и т.д. Все они имеют свои достоинства и недостатки, которые влияют на выбор конкретного метода измерения [5–7].

В настоящее время широкое распространение получил метод компьютерного моделирования процесса точения [8]. В работе предлагается рассмотреть этот метод в качестве способа определения уровня остаточных напряжений при точении жаропрочных материалов в зависимости от разных режимов резания, а именно при изменении скорости резания и подачи режущего инструмента. Целью исследования является проведение сравнительного анализа механического метода Давиденкова и конечно-элементного метода определения остаточных напряжений с целью установления факта, что метод компьютерного моделирования позволяет на стадии технологической подготовки производства прогнозировать с достаточной вероятностью возникновение деформационных явлений после механической обработки.

Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Современное производство на стадии технологической подготовки закладывает определенный уровень остаточных напряжений при обработке жаропрочных изделий. Применяемый

на производстве механический метод определения уровня остаточных напряжений является отработанным и надежным, однако имеет существенный недостаток – разрушение готового изделия после механической обработки.

Новейшие методы компьютерного моделирования позволяют спрогнозировать уровень остаточных напряжений на стадии технологической подготовки производства.

Методика исследований

При исследовании влияния элементов режимов резания на формирование остаточных напряжений использовали труднообрабатываемые материалы, обладающие высоким сопротивлением к пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред, применяемые в авиастроении, энергомашиностроении и производстве специальных изделий, имеющие существенно различный химический и структурно-фазовый состав,

физико-механические свойства, уровень относительной обрабатываемости резанием: жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе ХН73МБТЮ и ХН77ТЮР (табл. 1) [9].

Сплав ХН73МБТЮ (ЭИ698) относится к дисперсионно-твердеющим жаропрочным сплавам на никелевой основе, упрочняющихся вследствие выделения интерметаллидной фазы γ' – фазы типа $Ni_3(Al, Ti)$ [10]. Сложнолегированный сплав ХН73МБТЮ имеет высокую длительную прочность в интервале температур, сочетающихся с достаточно высокой пластичностью. Эти свойства сплава обеспечиваются в результате сложной термической обработки. Сплав ХН77ТЮР (ЭИ437 Б) относится к жаропрочным деформируемым сплавам на никелевой основе. Данный материал обладает высокой пластичностью, хорошо обрабатывается давлением, допускает штамповку, прокатку, профилирование, хорошо сваривается [11].

Таблица 1. Физико-механические свойства исследуемых материалов
Table 1. Physico-mechanical properties of the materials under study

Обрабатываемый материал Processed material	Состояние State	σ_b , МПа	σ_T , МПа	<i>НВ</i>	δ , %	ψ , %	Назначение Purpose
ХН73МБТЮ	Нагрев до 775 °С, выдержка 16 ч., охлаждение на воздухе +700 °С, выдержка 16–20 ч., охлаждение на воздухе Heating up to 775 °C, holding for 16 hours, cooling in air +700 °C, holding for 16–20 hours, cooling in air	1 210	800	285–341	31	24	Ответственные детали паровых и газовых турбин современных энергетических установок Critical parts of steam and gas turbines of modern energy installations
ХН77ТЮР	Аустенитизация при 1 080 °С в течение 8 ч., охлаждение на воздухе, старение при 700 °С в течение 16 ч., охлаждение на воздухе Austenitization at 1,080 °C for 8 hours, air cooling, aging at 700 °C for 16 hours, air cooling	950	660	321–255	20	21	Рабочие лопатки, турбинные диски, кольца и другие детали газовых турбин, для службы при температуре до 750 °С Working blades, turbine disks, rings and other parts of gas turbines, for service during temperatures up to 750 °C

Примечание. σ_b – временное сопротивление разрыву при растяжении; σ_T – предел текучести; *НВ* – твердость по Бринеллю; δ – относительное удлинение после разрыва; ψ – относительное сужение после разрыва.

Note. σ_b – temporary tensile tear resistance; σ_T – yield strength; *НВ* – Brinell hardness; δ – relative elongation after rupture; ψ – relative contraction after rupture.

При проведении экспериментов использовали режущий инструмент для обработки канавок (с геометрией режущего инструмента $\lambda = 0^0$, $\gamma = 0^0$, $\alpha = 7^0$, $r = 1,5$ мм) с физико-механическими характеристиками, представленными в табл. 2. Материал пластины – твердая мелкозернистая вольфрамокобальтовая основа с 6 % содержанием кобальта, обладающая повышенной красностойкостью и стойкостью к пластической деформации с покрытием TiAlN [12].

С целью исследования формирования остаточных напряжений в зависимости от режимов резания рациональное сочетание обрабатываемых материалов и инструмента выбраны согласно рекомендациям [13, 14].

Механическая обработка проводилась на токарном станке с числовым программным управлением, оснащенным двумя мотор-шпинделями. Зажим образцов производился путем движения задней шпиндельной бабки в сторону передней шпиндельной бабки дополнительно в тело заготовки после контакта на 0,2 мм. Схема базирования заготовки представлена на рис. 1.

Согласно литературным источникам [15–17] **Ошибка! Источник ссылки не найден.** для материала ХН73МБТЮ оптимальными режимами резания являются скорость резания в условиях чистовой обработки $V = 25$ м/мин., а подача режущего инструмента $S = 0,05$ мм/об.,

Таблица 2. Физико-механические свойства инструмента
Table 2. Physical and mechanical properties of the tool

Наименование Name	Материал ВК8 Material WK8
Плотность, г/см ³ Density, g/cm	14,4–14,8
Удельное электросопротивление, мкОм · см Specific electrical resistivity, μOhm · cm	18,6
Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹ Coefficient of linear thermal expansion, $\alpha \cdot 10^{-6}$ deg ⁻¹	5,1
Коэффициент теплопроводности, кал/(см · с · град) Thermal conductivity coefficient, cal/(cm · s · deg)	0,12
Предел прочности на изгиб, МПа Ultimate bending strength, MPa	1 568
Предел прочности на сжатие, МПа Ultimate compressive strength, MPa	4 127±22
Твердость HRA Hardness HRA	87

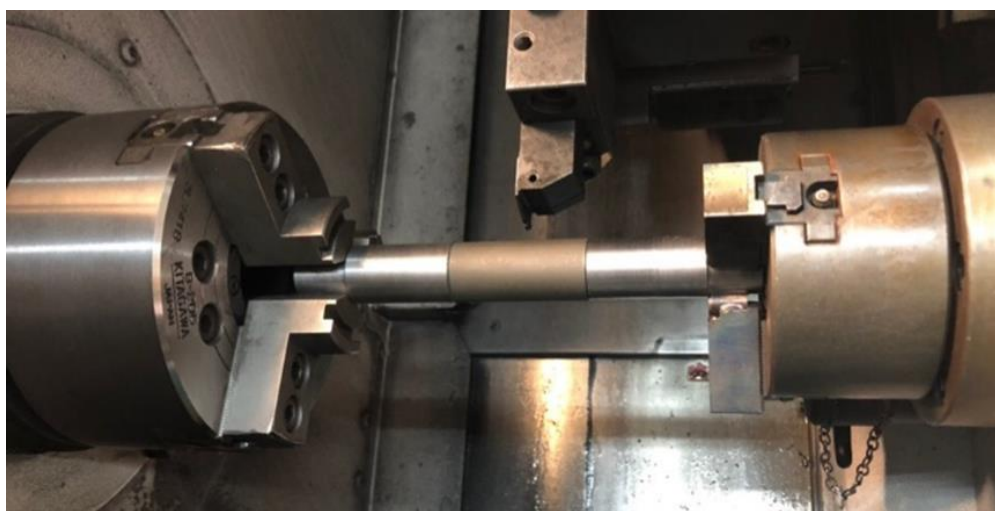


Рис. 1. Схема базирования заготовки
Fig. 1. Workpiece basing scheme

а для ХН77ТЮР – $V = 23$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об. В связи с этим на основании методики планирования эксперимента были определены режимы резания (табл. 3).

В результате обработки были получены втулки (рис. 2), из которых были вырезаны пластины электроэрозионным методом (рис. 3). После вырезки пластинок из образца, они выгнулись на различную величину прогиба в зависимости от режимов резания.

После вырезки пластины были подготовлены для определения остаточных напряжений

механическим методом Давиденкова и методом компьютерного моделирования.

Модель процесса резания для определения остаточных напряжений

Для моделирования процесса точения был использован программный пакет Deform3D.

При описании пластической деформации материала использована модель Джонсона – Кука, позволяющая учесть кинематическое упрочнение и адиабатический разогрев деформируемого материала:

Таблица 3. Режимы резания

Table 3. Cutting modes

Номер образца Sample number	Скорость резания, м/мин Cutting speed, m/min	Подача, мм/об Supply, mm/rev
ХН73МБТЮ		
1	25	0,05
2	30	0,05
3	40	0,05
4	20	0,05
5	50	0,05
ХН77ТЮР		
1	18	0,2
2	23	0,2
3	35	0,2

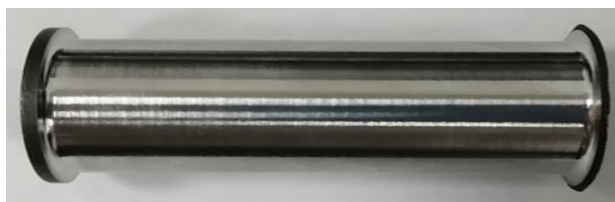


Рис. 2. Втулка после проведения лезвийной обработки
Fig. 2. Bushing after machining processing

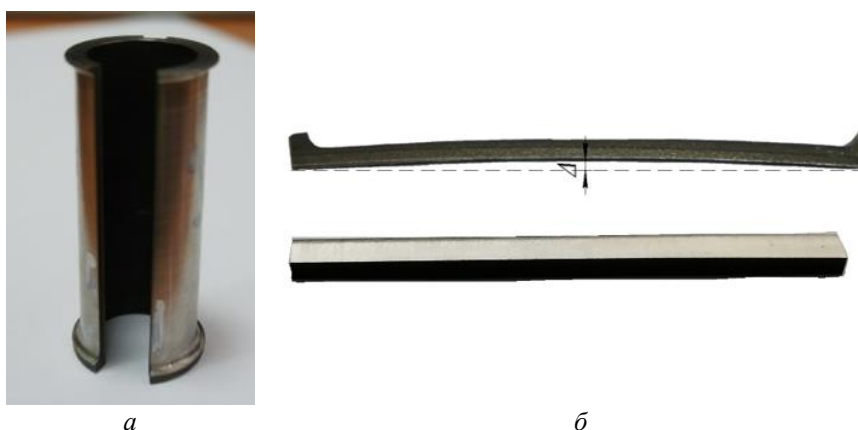


Рис. 3. Изготовление пластин электроэрозионным методом:
a – заготовка в виде втулки; *б* – готовые образцы
Fig. 3. Production of plates by the electroerosion method:
a – blank in the form of a sleeve; *b* – finished samples

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right],$$

где ε – эффективная пластическая деформация;

$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ – эффективная скорость пластической де-

формации; A – предел текучести неупрочненно-го материала, МПа; B – коэффициент упрочнения при деформировании; C – константа скорости деформации; n – экспонента твердости; m – константа термического смещения; T – текущая температура, °К; T_r – начальная температура, °К; T_m – температура плавления материала, °К [18].

Определение параметров модели выпол-

няется на основе информации о пластических деформациях материала при разных интенсивностях деформирования и температурах [19]. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку. Имитировалось сводное резание, величина подачи инструмента учитывалась за счет ширины среза (рис. 4).

Заготовка с постоянной скоростью V движется навстречу инструменту. Режущий инструмент имеет возможность двигаться только вдоль оси x . В качестве граничных условий происходит задание контакта, т.е. взаимодействие объектов друг с другом. При моделировании

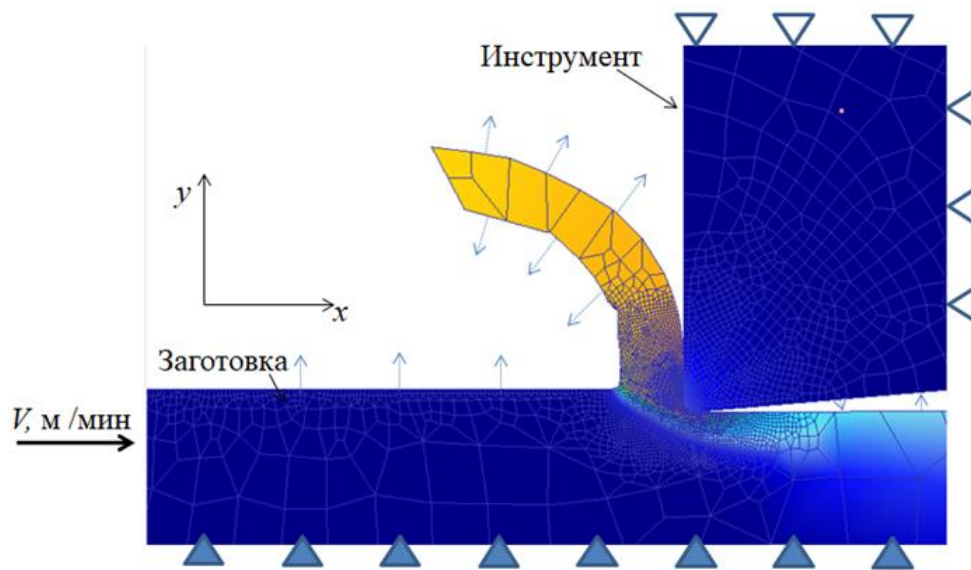


Рис. 4. Представление начальных граничных условий
Fig. 4. Model of the initial boundary conditions

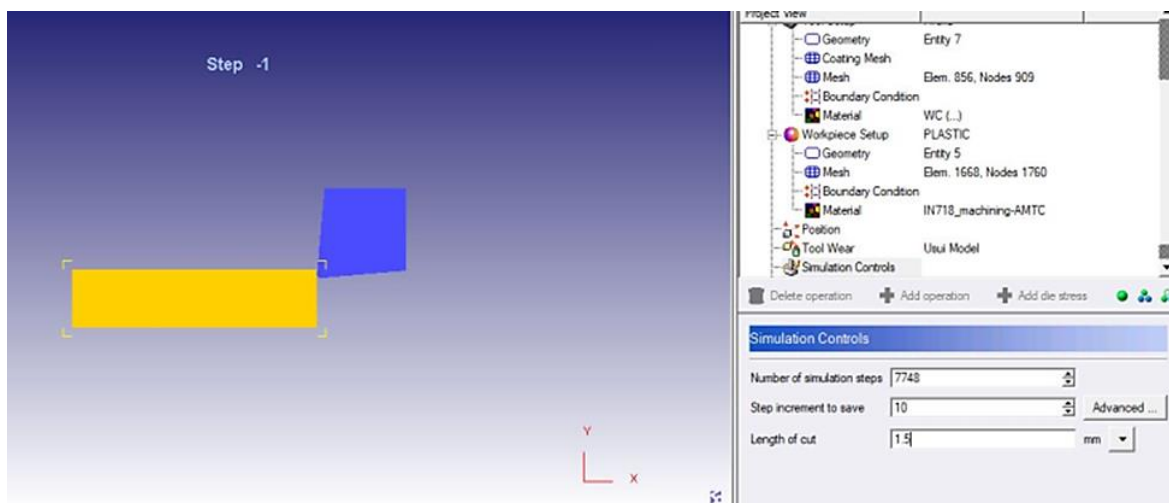


Рис. 5. Окно управления симуляцией
Fig. 5. Simulation control window

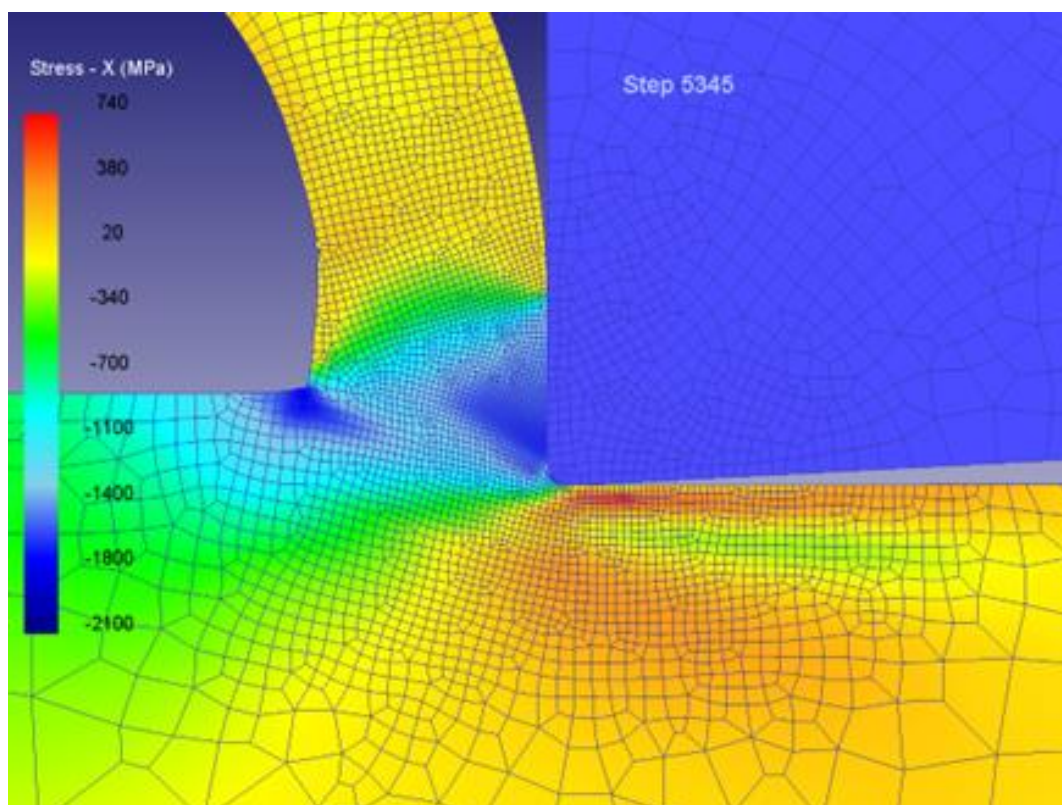


Рис. 6. Поле напряжений в зоне резания

Fig. 6. Stress field in the cutting zone

процесса течения необходимо создать взаимодействие заготовки и режущего инструмента, так как большое значение в данной задаче будет иметь внутреннее трение и деформации в плоскости сдвига в заготовке в процессе резания. В данных взаимодействиях указываются коэффициенты теплопередачи, трения и др. [20–23].

Далее программа просчитывает оптимальное количество шагов симуляции и шаг приращения для сохранения (рис. 5).

В результате моделирования определялись поля напряжения в зоне контакта материала с режущим инструментом (рис. 6).

Механический метод определения остаточных напряжений

Данный метод заключается в том, что с поверхности полученных пластин за счет электролитического и электрохимического травления снимается некоторый поверхностный слой, при этом происходит измерение деформации и толщины образца. Далее по аналитическим формулам рассчитываются остаточные напряжения.

Образец для измерения остаточных напряжений крепится на подвеске, предварительно весь покрытый лаком или воском, кроме исследуемой поверхности (рис. 7, 8).



Рис. 7. Исследуемый образец, закрепленный на подвеске

Fig. 7. Test sample mounted on a suspension



Рис. 8. Установка для исследования остаточных напряжений

Fig. 8. Installation for studying residual stresses

Путем электрохимического травления производилось непрерывное удаление напряженных поверхностных слоев и одновременно осуществлялась регистрация деформаций изгиба образца. Для точного измерения перемещений и деформаций применяют индикаторные, оптические приборы, тензометрию, индуктивные и токовихревые датчики, механотроны, топографическую технику, хрупкие покрытия и

др. В данном случае применялся лазерный триангуляционный датчик. Состав ванны для травления подбирался с учетом химического состава и свойств исследуемого металла. Скорость электрохимического травления зависит от плотности тока, состава, степени загрязнения электролита. Плотность тока выбиралась с учетом необходимой скорости травления и ограничивалась допустимой температурой нагрева электролита, повышение которой сопровождается значительными температурными деформациями установки и погрешностями измерений [24].

Результаты исследований

В результате проведенных исследований были получены зависимости (рис. 9, 10) формирования остаточных напряжений при различных скоростях резания ($V = 20\text{--}50$ м/мин.).

Изменение скорости резания не показало какой-либо четкой закономерности влияния на уровень остаточных напряжений. Это связано со сложными механизмами упрочнения обрабатываемого материала при возрастании скорости деформирования и с наложением многих факторов (неоднородность фазового состава и свойств материала, вариативность контактных напряжений и температур и др). В двух случаях из трех увеличение скорости резания приводит к повышению остаточных напряжений. С увеличением

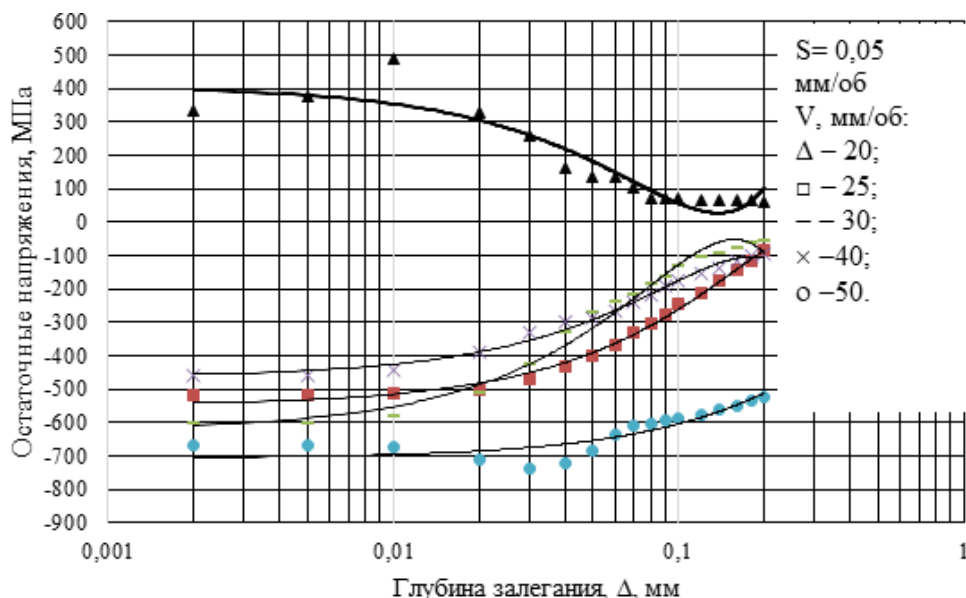


Рис. 9. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче резания и различных скоростях резания ХН73МБТЮ

Fig. 9. The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with a constant supply of cutting and different cutting speeds CrNi73MoNbTiAl

скорости резания снижается глубина проникновения напряжений постоянного уровня – с повышением скорости заготовка успевает прогреться на меньшую глубину.

При обработке образца из материала ХН77ТЮР при изменении скорости резания от 18 до 35 м/мин были получены зависимости, представленные на рис. 11 и 12.

Как видно из зависимостей при изменении скоростей на поверхности образца сформированы напряжения растяжения 210–750 МПа на глубине 0,005 мм. После преодоления экс-

тремума на глубине 0,01 мм напряжения растяжения переходят в напряжения сжатия, однако глубина их залегания незначительна. Напряжения растяжения на поверхности образца обусловлены преобладающим влиянием температурного фактора при механообработке. Результаты, полученные экспериментальным методом и методом компьютерного моделирования, коррелируют между собой в пределах 10 %, что является допустимым согласно исследованиям автора [25].

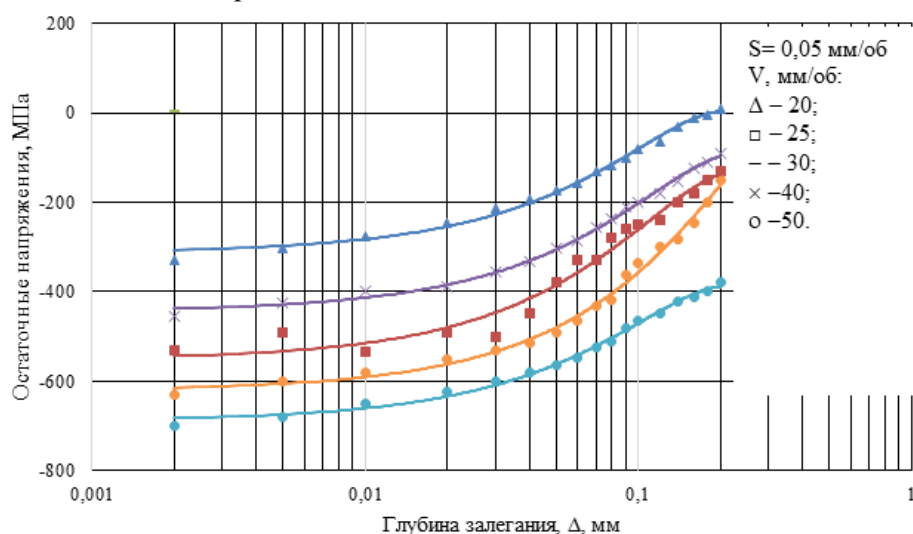


Рис. 10. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче режущего инструмента и различной скорости резания, полученных методом компьютерного моделирования ХН73МБТЮ

Fig. 10. The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with a constant supply of cutting tools and different cutting speeds obtained by the method computer simulation CrNi73MoNbTiAl

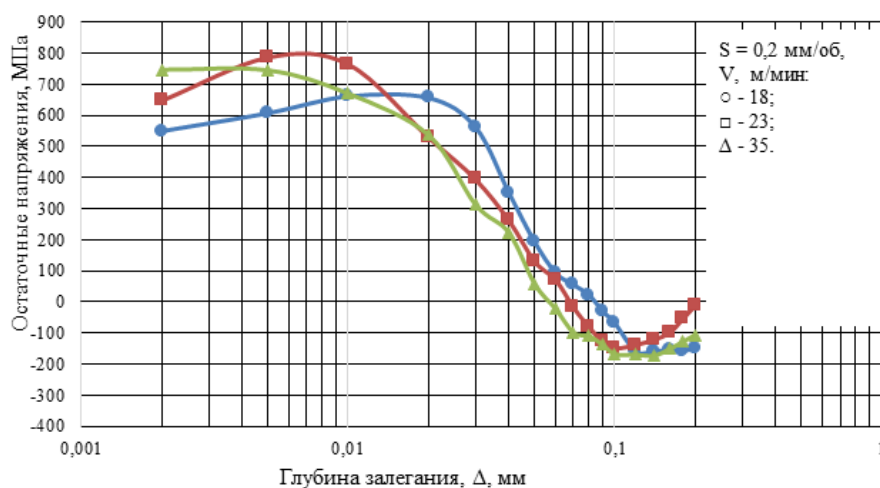


Рис. 11. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче резания и различных скоростях резания ХН77ТЮР

Fig. 11. The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with constant supply of cutting and different cutting speeds NIMONIC 80A

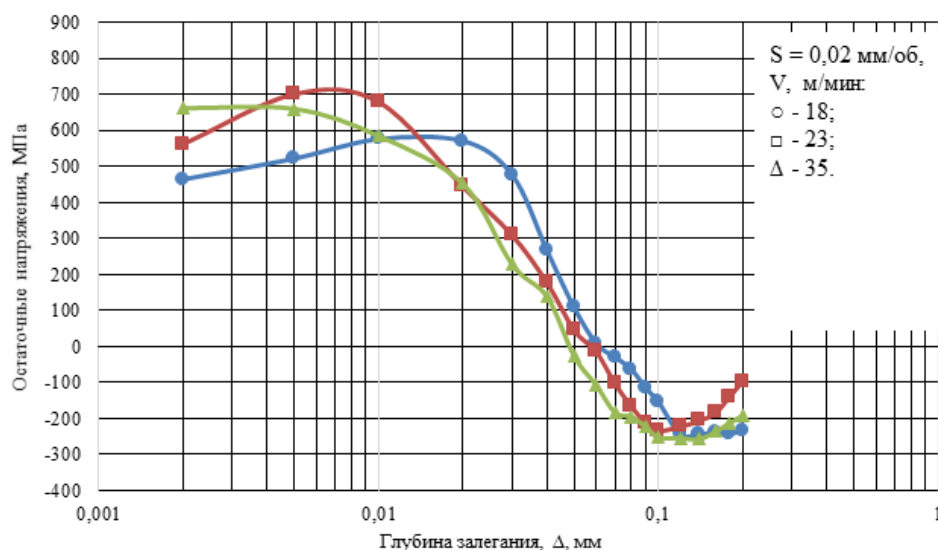


Рис. 12. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины их залеганий при точении при постоянной подаче режущего инструмента и различной скорости резания, полученных методом компьютерного моделирования ХН77ТЮР

Fig. 12. The dependence of the magnitude of residual stresses on the depth of their occurrence during turning with a constant supply of cutting tools and different cutting speeds obtained by computer modeling NIMONIC 80

Заключение

Скорость резания – самый сложный фактор, оказывающий влияние на характер остаточных напряжений [26, 27] и их неоднородное формирование вследствие взаимного воздействия пластической деформации и физико-механических превращений.

Однако применение метода компьютерного моделирования для определения остаточных напряжений при обработке жаропрочных материалов на этапе технологической подготовки производства позволяет прогнозировать и контролировать уровень и знак остаточных напряжений.

Для проверки адекватности компьютерной модели достаточно экспериментально определить уровень остаточных напряжений, а в дальнейшем возможно использование компьютерной модели для моделирования формирования остаточных напряжений.

Разработанная модель расчета остаточных напряжений при точении позволяет рассчитать глубину пластически деформированного слоя и распределение остаточных напряжений по глубине.

Список литературы

1. Безъязычный В.Ф. Влияние технологических условий механической обработки на величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2020. №1 (52). С. 51–57.
2. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2007. Vol. 30, Iss. 3. P. 173–205.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М. : Машгиз, 1963. 232 с.
4. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение, 1976. 278 с.
5. Мухин В.С. Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД. М. : Наука, 2005. 295 с.
6. Процессы формообразования деталей в машиностроении / В.М. Кишуров, Н.К. Криони, В.В. Постнов и др. М. : Машиностроение, 2015. 496 с.
7. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург : УрФУ, 2015. 247 с.
8. Fe Modelling and Simulation of the Turning Process Considering the Cutting Induced Hardening of Workpiece Materials / J. Li, F. Jiang, A. Jin et al. // SSRN : site. 2023. Jul. DOI: 10.2139/ssrn.4511598.
9. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. М. : Металлургия, 1983. 191 с.
10. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов. Красноярск : СФУ, 2008. 312 с.
11. Волков Г.М., Зуев В.М. Материаловедение. М. : Академия, 2008. 400 с.
12. Каталог Sandvik токарные инструменты 2017 // SteelCam : сайт. URL : <https://docs.steelcam.org/sandvik/katalog->

tokarnye-instrumenty-2017-page1 (Дата обращения 18.09.2023).

13. Резание материалов. Режущий инструмент / В.М. Кишуров, Н.К. Криони, В.В. Постнов и др. М. : Машиностроение, 2009. 491 с.

14. Обработка резанием в машиностроении / В.М. Балашов, В.В. Мешков, С.П. Рыков и др. Тверь : ТвГТУ, 2004. 176 с.

15. Резание материалов / С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе, В.А. Скрябин и др. Пенза : ПГУ, 2010. 628 с.

16. Технология машиностроения (в 2 кн.). Книга 1. Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин и др. М. : Высш. шк., 2003. 278 с.

17. Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М. Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. М. ; Л. : Машиностроение, 1964. 447 с.

18. Determination of the Johnson-Cook Constitutive Model Parameters of Materials by Cluster Global Optimization Algorithm / Z. Huang, L. Gao, Y. Wang et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 25. Iss. 9. P. 4099–4107. DOI: 10.1007/s11665-016-2178-1.

19. Соболев А.В., Радченков М.В. Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ // Изв. высш. учеб. заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 3. С. 82–93.

20. Deform-3D // Тесис : сайт. URL : https://tesis.com.ru/cae_brands/deform/3d.php (Дата обращения 18.09.2023).

21. A Gear Cutting Predictive Model Using the Finite Element Method / W. Liu, D. Ren, S. Usui et al. // 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations. 2013. Vol. 8. P. 51–56. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.064

22. Precision radial turning of AISI D2 steel / J. Paulo Davim, C. Maranhao, P. Faria et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 42. Iss. 9. P. 842–849. DOI:10.1007/s00170-008-1644-9.

23. Investigating Resulting Residual Stresses during Mechanical Forming Process / Stephen A Akinlabi, O.S. Fatoba, P.M. Mashini et al. // 3rd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering. Batu Ferringhi, 2017. Vol. 328. DOI: 10.1088/1757-899X/328/1/012012.

24. Овсеев Е.С. Обеспечение качества изготовления малогабаритных деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 144 с.

25. Криворучко Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.

26. Su Y. Effect of the cutting speed on the cutting mechanism in machining CFRP // Composite Structures. 2019. Vol. 220. P. 662–676.

27. Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х., Черников П.П. Анализ исследований влияния элементов режимов резания на возникновение остаточных напряжений при механообработке // Металлообработка. 2019. №3 (111). С. 10–15.

References

1. Bezyazychnyi V. F. Vliyanie tekhnologicheskikh uslovii mekhanicheskoi obrabotki na velichinu i kharakter raspredeleniya ostatochnykh napryazhenii v poverkhnostnom sloe detali [The influence of technological conditions of machining on the magnitude and nature of the distribution of residual stresses in the surface layer of the part]. *Vestnik RGATU im. P.A. Solov'eva* [Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solov'ev], 2020, no. 1 (52), pp. 51–57.

2. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2007, vol. 30, iss. 3, pp. 173–205.

3. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.

4. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.

5. Mukhin V.S. *Poverkhnost' . Tekhnologicheskie aspekty prochnosti detalei GTD* [Surface. Technological aspects of the strength of gas turbine engine parts]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 295 p.

6. Kishurov V.M., Krioni N.K., Postnov V.V., Chernikov P.P., Kishurov M.V. *Protsestry formoobrazovaniya detalei v mashinostroenii* [Processes of forming parts in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 2015. 496 p.

7. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. *Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii* [Residual stresses in metal production]. Ekaterinburg: UrFU Publ., 2015. 247 p.

8. Li J., Jiang F., Jin A., Zhang T., Wang X., Huang S., Zeng X., Yao H., Zhu D., Wu X., Yan L., Zha X., Guo B. Fe Modeling and Simulation of the Turning Process Considering the Cutting Induced Hardening of Workpiece Materials. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4511598> (Accessed September 18, 2023).

9. Maslenkov S.B. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1983. 191 p.

10. Merkulova G. A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh splavov* [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous alloys]. Krasnoyarsk: SFU Publ., 2008. 312 p.

11. Volkov G.M., Zuev V.M. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow: Akademiya Publ., 2008. 400 p.

12. Tokarnye instrumenty Sandvik (Elektronnyi resurs) [Sandvik Turning tools (Electronic resource)]. Available at: <https://docs.steelcam.org/sandvik/katalog-tokarnye-instrumenty-2017-page1> (Accessed September 18, 2023).

13. Kishurov V.M., Krioni N.K., Postnov V.V., Chernikov P.P. *Rezanie materialov. Rezhushchii instrument* [Cutting of materials. Cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 491 p.

14. Balashov V.M., Meshkov V.V., Rykov S.P., Skhirtladze A.G. *Obrabotka rezaniem v mashinostroenii* [Cutting in mechanical engineering]. Tver' : TvGTU Publ., 2004. 176 p.

15. Grigor'ev S.N., Skhirtladze A.G., Skryabin V.A., Zverovshchikov V.Z., Artemov I.I., Mashkov A.N., Voyachek I.I. *Rezanie materialov* [Cutting materials]. Penza: PGU Publ., 2010. 628 p.

16. Zhukov E.L., Kozar' I.I., Murashkin S.L., Rozovskii B.Ya., Dyagterev V.V., Soloveichik A.M. Tekhnologiya mashinostroeniya (v 2 kn.). Kniga 1. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya [Mechanical engineering technology (in 2 vol.). Vol. 1. Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 278 p.
17. Shifrin A.Sh., Reznitskii L.M. Obrabotka rezaniem korrozionnostoikikh, zharoprochnykh i titanovykh staley i splavov [Cutting processing of corrosion-resistant, heat-resistant and titanium steels and alloys]. Moscow-Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1964. 447 p.
18. Huang Z., Gao L., Wang Y., Wang F. Determination of the Johnson-Cook Constitutive Model Parameters of Materials by Cluster Global Optimization Algorithm. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, iss. 9, pp. 4099–4107.
19. Sobolev A.V., Radchenok M.V. Ispol'zovanie modeli plastichnosti Dzhonsona-Kuka v chislennom modelirovanii broskovykh ispytaniy konteynerov dlya transportirovaniya OYaT [Using the Johnson-Cook plasticity model in numerical modeling of throw tests of containers for transporting spent nuclear fuel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika* [Bulletins of higher educational organizations. Nuclear power], 2016, no. 3, pp. 82–93.
20. Deform-3D (Elektronnyi resurs) [Deform-3D (Electronic resource)]. Available at: https://tesis.com.ru/cae_brands/deform/3d.php (Accessed September 18, 2023).
21. Liu W., Ren D., Usui S., Wadell J., Marusich T.D. A Gear Cutting Predictive Model Using the Finite Element Method. *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, 2013, vol. 8, pp. 51–56.
22. Paulo Davim J., Maranhao C., Faria P., Abrao A., Rubio J.C., Silva L.R. Precision radial turning of AISI D2 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42, iss. 9, pp. 842–849.
23. Akinlabi S.A., Fatoba O.S., Mashinini P.M., Takinlabi E. Investigating Resulting Residual Stresses during Mechanical Forming Process. *3rd International Conference on Mechanical, Manufacturing and Process Plant Engineering. Batu Ferringhi*, 2017, vol. 328. DOI:10.1088/1757-899X/328/1/012012.
24. Ovseenko E.S. Obespechenie kachestva izgotovleniya malozhestkikh detalei tipa diskov gazoturbinnnykh ustanovok za schet snizheniya tekhnologicheskikh ostatochnykh deformatsii [Ensuring the quality of manufacturing of low-rigid parts such as disks of gas turbine units by reducing technological residual deformations]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2011, 144 p.
25. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy [Modeling of cutting processes by the finite element method: methodological foundations]. Sumy: Universitetskaya kniga Publ., 2012. 496 p.
26. Su Y. Effect of the cutting speed on the cutting mechanism in machining CFRP. *Composite Structures*, 2019, vol. 220, pp. 662–676.
27. Kilmetova L.R., Khadiullin S.Kh., Chernikov P.P. Analiz issledovaniy vliyaniya elementov rezhimov rezaniya na vozniknovenie ostatochnykh napryazhenii pri mekhanooobrabotke [Analysis of studies of the influence of cutting mode elements on the occurrence of residual stresses during machining]. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2019, no. 3 (111), pp. 10–15.

Информация об авторах

Кильметова Лилия Римовна, преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа; e-mail: kilmetovalr@gmail.com.

Information about the authors

Liliya R. Kil'metova, Lecturer of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, Ufa; e-mail: kilmetovalr@gmail.com.