

УДК 621.91.02, 004.94

doi 10.54708/19926502_2025_29210867

Влияние технологических условий резания на формирование ПОН при обработке труднообрабатываемых материалов

А.Р. Сайдуганов*, С.Х. Хадиуллин, П.П. Черников, А.А. Сазанов

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. В данной статье проводится анализ в области компьютерного моделирования влияния геометрических параметров режущего инструмента и режимов резания на формирование величин поверхностных остаточных напряжений (ПОН) с глубиной их распространения.

Ключевые слова: *поверхностные остаточные напряжения, режущий инструмент, режимы резания, математическое моделирование, процесс резания, конечно-элементный анализ.*

*andrewsai@mail.ru

Введение

Несмотря на многочисленные исследования в области определения ПОН, этот вопрос остается одним из ключевых и наиболее сложных в современной инженерной практике. Существующие методы часто демонстрируют недостаточную точность и ограниченную применимость в реальных производственных условиях, что затрудняет обеспечение разработчиком заданных параметров качества, величин и знака поверхностных остаточных напряжений согласно техническим требованиям конструкторской документации на всех этапах жизненного цикла изделия.

Важным преимуществом компьютерного моделирования является возможность анализа междисциплинарных расчетных моделей и визуализации скрытых процессов. Внедрение CAE-систем (Computer-Aided Engineering) открывает принципиально новые возможности для решения данной проблемы. Благодаря использованию передовых алгоритмов машинного обучения и возможностей компьютерного моделирования, CAE-системы способны обеспечить комплексный подход к моделированию процесса формирования поверхностных остаточных напряжений, их визуализации и интерпретации с высокой степенью точности.

Это позволяет не только оптимизировать процесс исследований, но и значительно сократить время на получение достоверных результатов, что делает CAE-технологии особенно перспективным инструментом в решении задачи определения величин ПОН.

Ускорение происходит благодаря интерактивному режиму работы с расчетными пакетами, позволяющими предварительно вводить и контролировать геометрию модели процесса резания, свойства материалов и граничные условия системы. Графическая информация, получаемая из среды разработки, обеспечивает удобный визуальный контроль результатов расчетов, которые часто являются единственным способом их оценки [1].

Повышение точности результатов достигается благодаря сочетанию компьютерных расчетов с экспериментальными данными. Например, дополнение численного эксперимента натурными испытаниями на поздних этапах проектирования помогает максимально приблизить полученные результаты к реальному поведению модели процесса резания.

На примере работ [2–4], связанных с анализом программных средств, рассматривается вопрос оптимизации процессов обработки металла резанием с учетом эффективности процесса (стойкости инструмента, качества поверхности детали) и его технологических условий. Анализируются функциональные возможности CAE-систем: DEFORM-3D, TWA, ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, FORGE [1].

Этапы моделирования процесса резания в САЕ-системах

Основные этапы моделирования процесса механической обработки, имеющие свои особенности в различных САЕ-системах, представлены следующим образом:

1. Выбор обрабатываемой заготовки и инструментального материала.

Выбор материала с возможностью редактирования физических свойств существующих материалов и создания новых. Рассмотрим возможности работы с материалами в различных программных средах: DEFORM-3D – встроенная база данных материалов с возможностью редактирования, поддержка нелинейных свойств материалов, возможность создания пользовательских кривых деформации, учет температурной зависимости свойств); TWA – упрощенная база материалов для задач штамповки, возможность добавления новых материалов, специализированные модели для пластических деформаций, учет анизотропии материалов; ABAQUS – расширенная библиотека материалов с детальной параметризацией, поддержка сложных моделей поведения материалов, возможность создания пользовательских материалов через UMAT, учет времени, температуры и истории нагружения; LS-DYNA – большая библиотека материалов для динамических расчетов, поддержка моделей повреждений и разрушения, возможность создания пользовательских моделей материалов, специализированные модели для ударных нагрузок; ANSYS – универсальная база материалов с возможностью расширения, поддержка мультифизических моделей, создание пользовательских материалов через APDL, детальное моделирование температурных зависимостей; FORGE – специализированная база материалов для обработки металлов давлением, учет изменений свойств при различных температурах, возможность создания материалов с учетом истории деформации, поддержка моделей упрочнения, общие возможности всех программ, редактирование существующих материалов, добавление новых материалов, учет основных физических свойств, импорт данных материалов из внешних источников.

Ключевые различия:

- DEFORM-3D и FORGE больше ориентированы на обработку металлов давлением;
- ABAQUS и ANSYS предлагают в большей степени универсальные возможности для различных типов материалов;
- LS-DYNA специализируется на динамических нагрузках и ударных воздействиях;
- TWA имеет упрощенный подход, ориентированный на задачи штамповки.

Все вышеуказанные программы позволяют создавать новые материалы путем задания необходимых свойств, но различаются в возможностях учета сложных зависимостей (температуры, времени, истории нагружения) и способах реализации пользовательских моделей материалов.

2. Определение геометрии заготовки и режущего инструмента.

Например, для создания геометрических объектов в DEFORM-3D используются модули генерации твердотельных объектов-примитивов (призма, цилиндр) и генерации твердотельной модели инструмента из библиотеки, Load a tool from Library. Рассмотрим особенности создания геометрических объектов в других программных средах: TWA – специализированные инструменты для моделирования штампов и инструментов, автоматическая генерация контактных поверхностей, интегрированная система проверки коллизий; ABAQUS – продвинутые инструменты для создания сложных геометрий, Parametric Modeling для параметрического моделирования, Direct Modeling для прямого редактирования геометрии, поддержка NURBS поверхностей; LS-DYNA – поддержка импорта CAD-моделей; ANSYS – Parametric Design Language для параметрического моделирования, Direct Modeling инструменты для прямого редактирования геометрии, интеграция с CAD-системами; FORGE – встроенная библиотека инструментов и заготовок, автоматическое создание контактных поверхностей, инструменты для оптимизации геометрии.

Общие особенности всех сред: возможность импорта готовых моделей из других форматов, инструменты для проверки качества геометрии, поддержка параметрического моделирования, возможность создания ассоциативных связей между элементами, инструменты для анализа и исправления ошибок геометрии. Каждая среда имеет свои уникальные инстру-

менты и особенности, которые оптимизированы под определенные задачи проектирования и моделирования в области металлообработки и анализа физических процессов.

3. Построение сетки.

Создание сетки, влияющей на общую точность модели и время вычислений, возможно двумя методами: абсолютным и относительным. Абсолютный метод позволяет определить сетку с указанным числом конечных элементов, а относительный – с заданным соотношением максимального и минимального конечного элемента в сетке.

Сравнение методов создания сетки в различных программных средах: DEFORM-3D – автоматическое и ручное создание сетки, адаптивное измельчение сетки в зонах концентрации напряжений, возможность задания неравномерной сетки, контроль размера элементов через параметры дискретизации; TWA – простые инструменты для генерации сетки; автоматическое определение размеров элементов; ограниченные возможности настройки параметров сетки; фокус на равномерной сетке для задач штамповки; ABAQUS – расширенные инструменты для создания различных типов сеток, адаптивная сетка с автоматическим измельчением, возможность задания размерных ограничений, инструменты для контроля качества элементов; LS-DYNA – специализированные методы создания сетки для динамических расчетов, поддержка различных типов конечных элементов, возможность создания гибридных сеток, инструменты для оптимизации размера элементов; ANSYS – многочисленные методы генерации сетки, адаптивное измельчение с учетом градиентов, детальный контроль качества элементов, возможность создания структурированных и неструктурированных сеток; FORGE – специализированные методы создания сетки для задач ОМД, автоматическое определение размеров элементов, возможность локального измельчения сетки, учет особенностей геометрии инструмента. Общие методы всех программ: абсолютный метод (указание точного числа элементов); относительный метод (задание соотношения размеров элементов); автоматическое создание сетки; возможность ручного редактирования. Ключевые различия: ABAQUS и ANSYS предлагают наиболее широкий спектр методов создания сетки; TWA имеет упрощенный подход к созданию сетки. Влияние на моделирование: более мелкая сетка повышает точность, но увеличивает время расчета; неравномерная сетка позволяет оптимизировать расчет; адаптивная сетка автоматически подстраивается под особенности нагрузки; качество сетки существенно влияет на сходимость решения. Таким образом, при выборе метода создания сетки важно учитывать: тип решаемой задачи, требуемую точность, вычислительные ресурсы, особенности геометрии, характер нагрузок.

4. Определение граничных и начальных условий.

Для реализации процесса моделирования необходимо зафиксировать заготовку, определить движение инструмента относительно заготовки и задать параметры взаимодействия между ними. Это связано с тем, что на процесс резания значительное влияние оказывают внутреннее трение и деформации в плоскости сдвига в материале заготовки. В процессе взаимодействия учитываются такие показатели, как теплопроводность, коэффициент трения и другие.

Рассмотрим сравнение возможностей моделирования процессов обработки в различных программных средах: DEFORM-3D – детальное моделирование контактного взаимодействия, учет температурно-зависимого коэффициента трения, моделирование различных типов закрепления, автоматическое определение зон контакта; TWA – специализированные модели контактного взаимодействия для штамповки, упрощенное задание условий закрепления, фиксированные траектории движения инструмента, базовые модели трения; ABAQUS – расширенные возможности моделирования контакта, поддержка различных моделей трения, детальное задание условий закрепления, учет температурного влияния на контакт; LS-DYNA – специализированные модели высокоскоростного контакта, упрощенное задание закрепления, поддержка сложных траекторий движения, модели динамического взаимодействия; ANSYS – универсальные модели контактного взаимодействия, детальное задание условий закрепления, поддержка различных моделей трения, комплексный учет тепловых

эффектов; FORGE – специализированные модели для обработки металлов давлением, детальное моделирование контактного взаимодействия, учет особенностей закрепления, специализированные модели трения. Общие возможности всех программ: задание условий закрепления, определение траекторий движения инструмента, учет коэффициента трения, моделирование тепловых эффектов. Особенности моделирования: точность результатов зависит от корректности задания условий контакта, необходимо учитывать температурную зависимость параметров, качество моделирования определяется точностью задания граничных условий, важно правильно выбирать модели трения и теплопередачи.

5. Визуализация и анализ результатов численного моделирования.

Сравнение возможностей визуализации и анализа результатов в различных программных средах: DEFORM-3D – визуализация полей напряжений и деформаций в процессе деформации, анимация процесса формообразования, построение графиков зависимости параметров, специализированные инструменты для анализа процессов ОМД; TWA – базовая визуализация результатов штамповки, графики силовых параметров, простые инструменты для анализа качества изделия, визуализация контактных зон; ABAQUS – расширенные возможности визуализации полей, 3D-анимация процессов, интерактивные графики и диаграммы, экспорт результатов в различные форматы; LS-DYNA – специализированная визуализация динамических процессов, траектории движения элементов, визуализация повреждений и разрушений, анимация ударных воздействий; ANSYS – универсальная система визуализации результатов, построение срезов и изолиний, создание анимаций, экспорт в различные форматы; FORGE – специализированная визуализация процессов ОМД, анализ температурных полей, визуализация течения металла, построение графиков силовых параметров. Общие возможности всех программ: визуализация полей напряжений и деформаций, построение графиков зависимостей, создание анимаций процессов, экспорт результатов. Ключевые различия: DEFORM-3D и FORGE специализируются на визуализации процессов ОМД, ABAQUS и ANSYS предлагают более универсальные инструменты визуализации, LS-DYNA фокусируется на визуализации динамических процессов, TWA имеет упрощенный подход к визуализации. Особенности анализа результатов: возможность построения срезов и сечений, создание изолиний и контуров, экспорт данных для дальнейшего анализа, сравнение различных вариантов решения.

Все программы позволяют экспортировать результаты в различные форматы для дальнейшей обработки и представления, но различаются в возможностях интерактивного анализа и специализированных инструментов визуализации, соответствующих их основной области применения.

Обсуждение

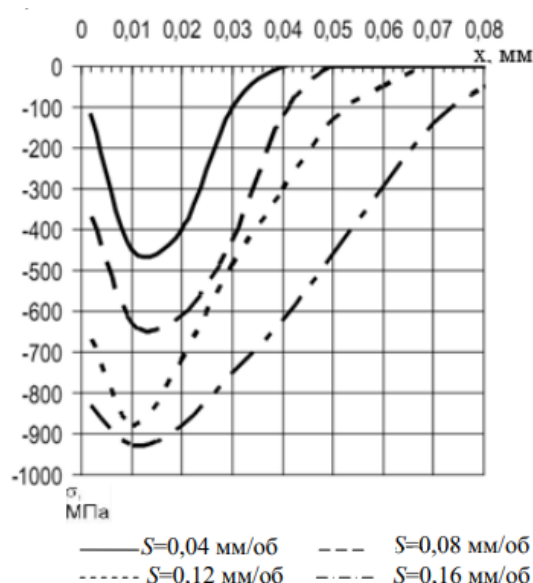
Результат анализа работ [5–13] показал, что остаточные напряжения могут быть растягивающими или сжимающими в зависимости от режимов резания (скорости, подачи и глубины). Наиболее значимыми параметрами, влияющими на величину ПОН, являются в первую очередь подача (Рис. 1а) режущего инструмента, а затем скорость (Рис. 1б) резания. Проведенное в работе [14] математическое моделирование по исследованию влияния элементов режимов резания на формирование остаточных напряжений показало, что при точении жаропрочного сплава на никелевой основе ХН73МБТЮ-ВД на поверхности заготовки сформировались напряжения сжатия $\sim 400\text{--}600$ МПа и наиболее значимым параметром при их формировании является величина подачи режущего инструмента (Рис. 2а), а затем скорость резания (Рис. 2б).

Кроме того, исследование формирования поверхностных остаточных напряжений, возникающих в результате лезвийной обработки ХН73МБТЮ-ВД, показало, что на энерго-силовые параметры процесса резания так же существенно влияет изменение заднего угла α в результате износа инструмента. Моделирование определило, что в случае $\alpha = 3^\circ$ температура поверхности детали в зоне резания превышает 800°C , а при $\alpha = 10^\circ$ она составляет 600°C , напряжения же на поверхности детали в зоне резания – порядка 1400 МПа и 1200 МПа соот-

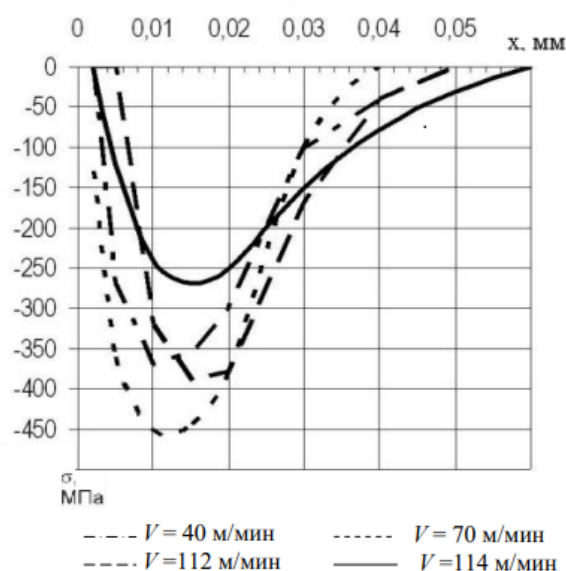
ветственно (Рис. 3). Это подтверждается работами [15, 16], где приводятся данные о том, что увеличение ширины фаски износа инструмента по задней поверхности повышает напряженность поверхностного слоя.

Также практический интерес представляет оценка влияния переднего угла γ при резании жаропрочного материала, где изменяется передний угол режущей пластины ($\gamma_1 = -6^\circ$, $\gamma_2 = 0^\circ$, $\gamma_3 = +6^\circ$). В результате этого авторы исследования [17] получили зависимости остаточных напряжений по глубине их залеганий в зависимости от значения переднего угла (Рис. 4).

Увеличение радиуса при вершине резца, работающего на постоянной скорости резания, снижает максимальные растягивающие напряжения и глубину их залегания [16].

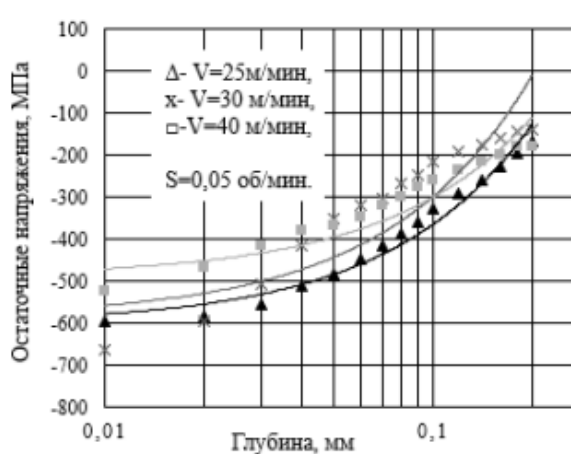


(а)

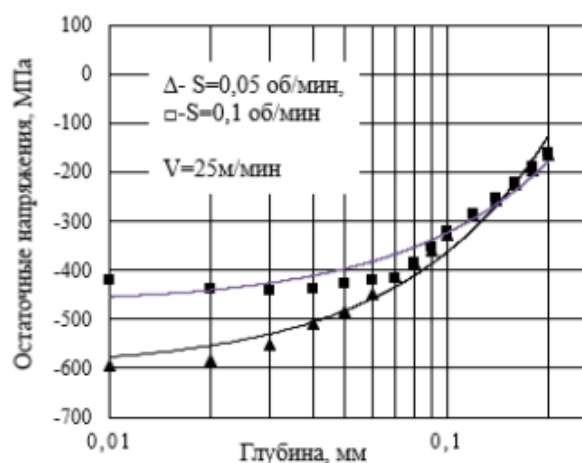


(б)

Рисунок 1. Схема влияния подачи (а) и скорости (б) на величину тангенциальных напряжений и глубину их залегания [10].



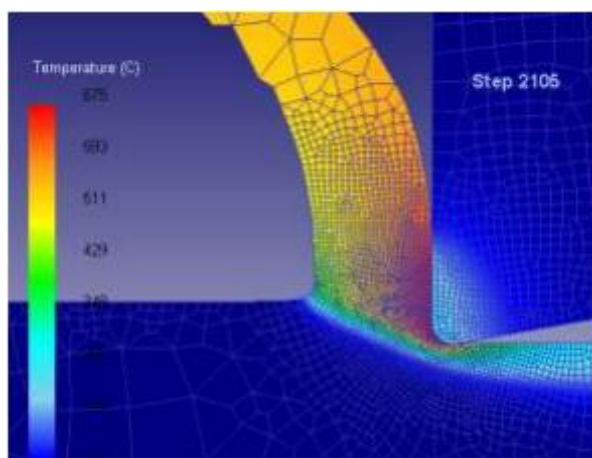
(а)



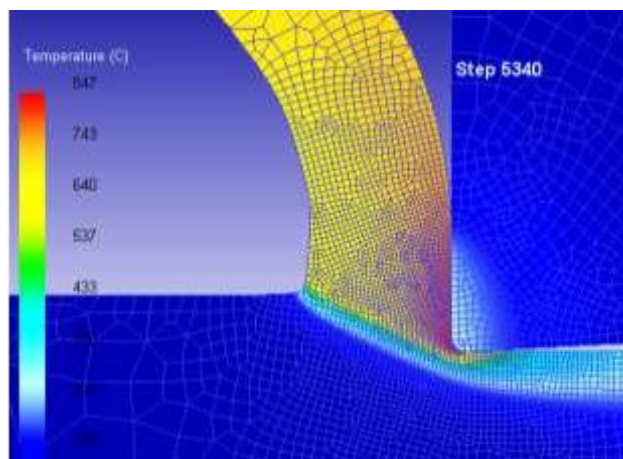
(б)

Рисунок 2. Зависимость величины остаточных напряжений, полученных методом компьютерного моделирования, от глубины залегания [14]:

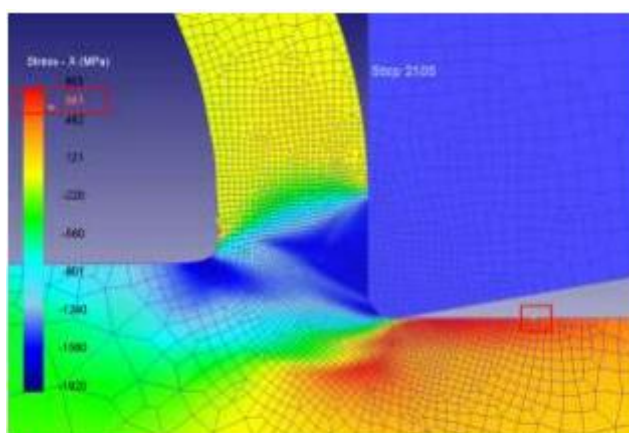
(а) $S = 0,05$ об/мин, $V = \text{Var}$; (б) $V = 25$ м/мин, $S = \text{Var}$.



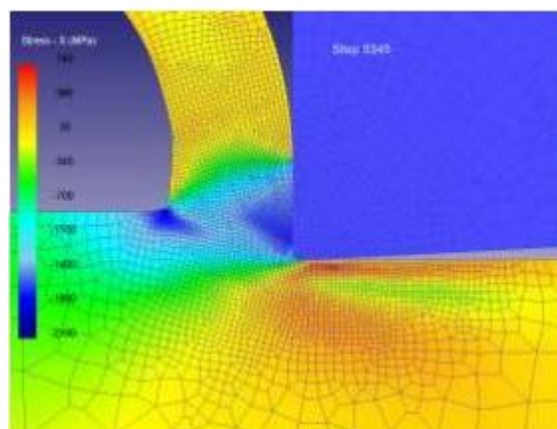
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3. Визуализация распределения температуры (а, б) и остаточных напряжений (в, г) в зоне резания при $\alpha = 10^\circ$ (а, в) и $\alpha = 3^\circ$ (б, г) [15].

Как видно (Рис. 4), начальный уровень остаточных напряжений находится в диапазоне от 10 до 220 МПа. При точении жаропрочного никелевого сплава на поверхности формируются напряжения растяжения, которые уменьшаются на глубине 0,09 мм, затем переходят в напряжения сжатия.

Сравнивая результаты численного (компьютерного) моделирования с данными [16], где приводятся теоретические и практические выкладки, можно сделать вывод, что использование резцов с большими отрицательными передними углами для обработки деталей из жаропрочных материалов не снижает напряжения растяжения, тем более, что при изменении передних углов от положительных значений к отрицательным резко увеличивается глубина и степень наклепа поверхностного слоя. Поэтому возникает вопрос о необходимости проведения дополнительных исследований о степени влияния переднего угла на величину ПОН.

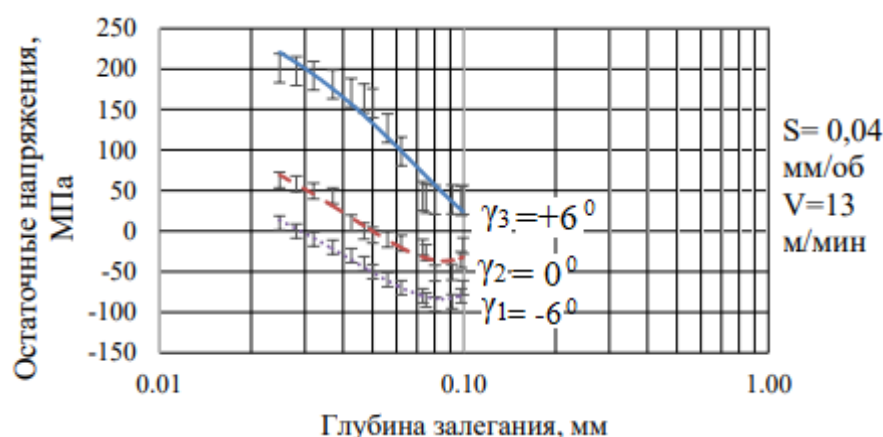


Рисунок 4. Влияние переднего угла на зависимость остаточных напряжений от глубины их залегания [17].

Заключение

В процессе резания ПОН возникают в результате термопластической деформации под воздействием технологических (подача и скорость резания) и конструктивных (геометрические параметры) элементов режущего инструмента на поверхность обрабатываемого материала.

При сравнительном анализе результатов исследований методами компьютерного моделирования величин ПОН с теоретическими и практическими результатами ведущих российских и зарубежных ученых [1–17] установлено:

1. Существенное влияние на формирование ПОН оказывает геометрия инструмента, а именно задний угол (α), в результате износа режущего инструмента повышается действие силового фактора. Также практический интерес представляет оценка влияния переднего угла γ , т.к. изменение переднего угла от $+15$ до -15° при обработке деталей из жаропрочных сплавов приводит к незначительному снижению растягивающих напряжений, но существенно повышает глубину их появления.

2. Результаты исследования влияния элементов режимов резания на формирование ПОН показали, что наиболее значимым параметром при их формировании является величина подачи режущего инструмента; зависимости $\sigma_{\tau \max} = f(S)$ могут быть монотонно убывающими, монотонно возрастающими или иметь экстремальный характер. Главным фактором, определяющим характер указанной зависимости, является температура резания, а затем скорость резания. При точении деталей из жаропрочных материалов на низких скоростях резания, когда температура недостаточна для протекания термопластических деформаций, в поверхностном слое в осевом направлении формируются сжимающие напряжения. При температуре начала термопластических деформаций осевые сжимающие напряжения переходят в напряжения растяжения, при дальнейшем повышении скорости до оптимальной напряжения растяжения растут и при $V > V_0$ стабилизируются.

3. Наличие принципиальной сходимости результатов влияния технологических и конструктивных элементов режущего инструмента на формирование знакопеременного характера ПОН при механической обработке труднообрабатываемых материалов.

4. Для более глубокого понимания процессов формирования ПОН необходимо проведение дополнительных исследований с применением компьютерного моделирования и экспериментального анализа величин ПОН после механической обработки.

Литература:

1. Криворучко Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / под общ. ред. В. А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2012. 81 с. [Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Modeling of cutting processes by the

- finite element method: methodological foundations: monograph / ed. by V.A. Zaloga. Sumy: Universitetskaya Kniga, 2012. 81 p. (in Russian)].
2. Глухов И.А., Кильметова Л.Р., Фомин С.Ю., Хадиуллин С.Х. Анализ программных средств для моделирования процесса резания при оценке эффекта высокоскоростной обработки. В сб.: Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 23–24 марта 2017 года. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2017. С. 29–35 [Glukhov I.A., Kilmetova L.R., Fomin S.Yu., Khadiullin S.Kh. Analysis of software for modeling the cutting process when assessing the effect of high-speed treatment. In: Modern Trends in Metalworking Technologies and Designs of Metalworking Machines and Components: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference, Ufa, March 23–24, 2017. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2017. P. 29–35 (in Russian)].
 3. Khadiullin S.K. Thermodynamic assessment of the operational efficiency of hard-alloy tools // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29. No. 12. P. 1290–1292.
 4. Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х. Исследование методом компьютерного моделирования влияния скорости резания на формирование остаточных напряжений. В сб.: Электрофизические методы обработки в современной промышленности: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 14–15 декабря 2020 года. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 74–78. [Kilmetova L.R., Khadiullin S.Kh. Study of the effect of cutting speed on the formation of residual stresses using computer modeling. In: Electrophysical Methods of Processing in Modern Industry: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduate and Undergraduate Students, Perm, December 14–15, 2020. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2021. P. 74–78 (in Russian)].
 5. Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х., Черников П.П. Исследование и анализ остаточных напряжений при механической обработке. В сб.: Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 26–28 февраля 2019 года. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. С. 30–35. [Kilmetova L.R., Khadiullin S.Kh., Chernikov P.P. Research and analysis of residual stresses during mechanical processing. In: Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering. Problems and Growth Points: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Ufa, February 26–28, 2019. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2019. P. 30–35 (in Russian)].
 6. Подзей А.В., Сулима А.Н., Евстигнеев М.И. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с. [Podzey A.V., Sulima A.N., Evstigneev M.I. Technological residual stresses. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973. 216 p. (in Russian)].
 7. Черников П.П., Старовойтов С.В., Шарипов Б.У. Влияние внешних условий и СОТС на физико-механические свойства контакта инструментального и обрабатываемого материалов // СТИН. 2011. №11. С.34. [Chernikov P.P., Starovoytov S.V., Sharipov B.U. Influence of external conditions and cooling agents on the physical and mechanical properties of the contact of tool and workpiece materials // STIN. 2011. No. 11. P. 34 (in Russian)].
 8. Sadat A.B., Bailey J.A. Residual stresses in turned AISI 4340 steel // Experimental Mechanics. 1987. No. 27(1). P. 80–85.
 9. Васькин К.Я. Расчет остаточных напряжений при точении поверхности с износостойкими покрытиями // Вектор науки ТГУ. 2012. № 3(21), С. 60–65. [Vaskin K.Ya. Calculation of residual pressure at turning surfaces with wearproof coverings // Science Vector of Togliatti State University. 2012. No. 3(21). P. 60–65 (in Russian)].
 10. Овseenко Е.С. Обеспечение качества изготовления маложестких деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.08. Москва, 2011. 144 с. [Ovseenko E.S. Ensuring the quality of manufacturing low-rigidity parts such as disks of gas

- turbine units by reducing technological residual deformations: Cand. Sci. thesis. Moscow, 2011. 144 p. (in Russian)].
11. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с. [Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 344 p. (in Russian)].
12. Liu C.R., Barash M.M. Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface // Journal of Engineering for Industry. 1982. No. 104(3). P. 257–264.
13. Jacobson M. Surface integrity of hard-turned M50 steel // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2002. Vol. 216. No. 1. P. 47–54.
14. Кильметова Л.Р., Новикова С.К., Хадиуллин С.Х. Исследование процесса механообработки методом конечно-элементного анализа. В сб.: Инновационное и цифровое машиностроение: Материалы Всероссийских научно-технических конференций, Уфа, 07–09 апреля 2021 года. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. С. 40–44. [Kilmetova L.R., Novikova S.K., Khadiullin S.Kh. Study of the machining process using finite element analysis. In: Innovative and Digital Mechanical Engineering: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conferences, Ufa, April 7–9, 2021. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2021. P. 40–44].
15. Новиков С.В., Астанин В.В., Песин М.В., Макаров В.Ф., Дубин А.И., Хадиуллин С.Х., Кильметова Л.Р. Поверхностные остаточные напряжения в деталях из сплава ХН73МБТЮ-ВД и методы их контроля. В сб.: Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 24 сентября 2021 года. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. С. 64–79. [Novikov S.V., Astanin V.V., Pesin M.V., Makarov V.F., Dubin A.I., Khadiullin S.Kh., Kilmetova L.R. Surface residual stresses in parts made of UNS N07750 alloy and methods for their control. In: Modern High-Temperature Nickel-Based Deformable Alloys and Their Production Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, September 24, 2021. Moscow: All-Russian Research Institute of Aviation Materials, 2021. P. 64–79 (in Russian)].
16. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М., Машиностроение, 1976. 278 с. [Makarov A.D. Optimization of cutting processes. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 278 p. (in Russian)].
17. Кильметова Л.Р., Хадиуллин С. Х. Исследование влияние геометрии режущего инструмента при резании жаропрочного материала методом компьютерного моделирования. В сб.: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 10–14 апреля 2023 года. Часть 2. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. С. 477–481. [Kilmetova L.R., Khadiullin S.Kh. Study of the influence of cutting tool geometry when cutting high-temperature material using computer modeling // Youth and Science: Current Issues of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the VI All-Russian National Scientific Conference of Young Scientists, Komsomolsk-on-Amur, April 10–14, 2023. Part 2. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University, 2023. P. 477–481 (in Russian)].

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 упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

Об авторах:

САЙДУГАНОВ Андрей Радионович, ассистент кафедры АТП, Уфимский университет науки и технологий, 32, ул. Заки Валиди, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450076, Россия, andrewsai@mail.ru.

ХАДИУЛЛИН Салават Хакимович, к.т.н., доцент кафедры АТП, Уфимский университет науки и технологий, 32, ул. Заки Валиди, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450076, Россия, hadiullin.sh@ugatu.su.

ЧЕРНИКОВ Петр Петрович, к.т.н., доцент, доцент кафедры АТП, Уфимский университет науки и технологий, 32, ул. Заки Валиди, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450076, Россия, chernikov.pp@ugatu.su.

САЗАНОВ Андрей Александрович, инженер кафедры АТП, Уфимский университет науки и технологий, 32, ул. Заки Валиди, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450076, Россия, 108409@stud.uust.ru.

Metadata:

Title: The influence of technological cutting conditions on the formation of SRS during the processing of difficult-to-cut materials.

Author 1: Andrei Radionovich Saiduganov, Assistant Professor of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia, andrewsai@mail.ru

Author 2: Salavat Khakimovich Khadiullin, Cand. Sci., Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia, hadiullin.sh@ugatu.su, 0000-0003-2529-8096, 23670289700.

Author 3: Petr Petrovich Chernikov, Cand. Sci., Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia, chernikov.pp@ugatu.su.

Author 4: Andrei Alexandrovich Sazanov, Engineer of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450076, Russia, 108409@stud.uust.ru

Abstract: This paper presents a study of the influence of cutting tool geometric parameters and cutting modes on the formation of surface residual stress values. These studies were carried out using computer modeling.

Keywords: surface residual stresses, cutting tool, cutting conditions, mathematical modeling, cutting process, finite element analysis.