

УДК 621.9.08

АНАЛИЗ ПРИЧИН И ИСТОЧНИКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Р. Р. БАШАРОВ¹, Л. Р. КИЛЬМЕТОВА², С. В. СТАРОВОЙТОВ³,
С. Х. ХАДИУЛЛИН⁴, П. П. ЧЕРНИКОВ⁵

¹rash@mail.ru, ²kilmetovalr@gmail.com, ³sv_starov@mail.ru, ⁴salavathh@gmail.com, ⁵chernikov@mail.ru

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

³НПП Технопарк Авиационных Технологий

Поступила в редакцию 07.12.2018

Аннотация. В рамках выявления причин возникновения остаточных напряжений проведен литературный обзор зарубежной и отечественной литературы, который показал многообразие проводимых аналитических и эмпирических исследований. Исследования проведены для разных типов обработки: токарной и фрезерной. В статье описано влияние элементов режимов резания: скорости, подачи и глубины резания, геометрии режущего инструмента, а также его износа как возможных причин возникновения остаточных напряжений. Рассмотрено возникновение сжимающих или растягивающих напряжений в зависимости от материала обрабатываемой детали.

Ключевые слова: остаточные напряжения; режимы резания; режущий инструмент; смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС).

ВВЕДЕНИЕ

К деталям узлов авиадвигателей, работающих при высоких температурах и в сложноподвижном состоянии поверхностных слоев, в особых условиях внешнего воздействия агрессивной газовой среды, предъявляются требования высокой прочности, жаростойкости и коррозионной стойкости [1].

Остаточные напряжения являются причинами возникновения деформаций, трещин в деталях, а также изменения их размеров, взаимного расположения поверхностей. Таким образом, они оказывают отрицательное влияние на качество поверхностей деталей машин, что, в свою очередь, сказывается на эксплуатационных свойствах изделий. Особенно актуальна проблема обеспечения контроля остаточных напряжений для особо ответственных деталей, например для деталей газотурбинного двигателя (ГТД).

В рамках данной работы была поставлена задача осуществления обзора исследовательских работ зарубежных и отечественных ученых, которые раскрывают причины

возникновения остаточных напряжений после механообработки.

Впервые на появление остаточных напряжений в деформированном металле обратили внимание Б. Бибер и Г. Людерс в 1836 г. Позднее К. Хартман продемонстрировал свой опыт моделирования остаточных напряжений: при растяжении или сжатии полированного образца на его поверхности появляется отчетливая игра света в виде сетки как на волнующейся жидкости [2].

Считается, что систематическое изучение остаточных напряжений было начато В. И. Родманом (1857 г.), Н. В. Калакуцким (1867 г.) и И. А. Умовым (1871 г.). Одним из первых фундаментальных работ в этой области были работы русского ученого Н. В. Калакуцкого, предложившего механический метод определения остаточных напряжений, и работы И. Гейна [3].

Причины возникновения остаточных напряжений при обработке деталей многообразны, и действуют они совокупно.

Так, исследовалось механическое и тепловое влияние на их возникновение, устано-

вившее [4], что тепловое влияние, как правило, незначительно.

С увеличением количества исследований конкретизировалось, какой элемент процесса резания оказывает наибольшее воздействие на исследуемый фактор. Установлено, что наибольший вклад в образование остаточных напряжений оказывает величина подачи режущего инструмента, затем скорость резания и глубина резания. Для измерения остаточных напряжений в ходе экспериментов авторы работ применяли различные методы: травление, рентгенография и т.д.

Отмечено, что геометрия режущего инструмента оказывает влияние на формирование состояния поверхностного слоя. В исследованиях [5] отмечено влияние радиуса скругления режущей кромки резца. Чем меньше радиус скругления режущей кромки, тем ниже величина максимальных остаточных напряжений.

Тип остаточных напряжений зависит от взаимоотношения между механическими и тепловыми эффектами во время процесса резания.

Ключевые идеи. Причины остаточных напряжений разнообразны, и достаточно сложно сказать о влиянии одного лишь элемента. Приведенный литературный обзор свидетельствует о необходимости поиска надежных расчетно-экспериментальных методов не только установления причин, но и способов контроля остаточных напряжений.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При условии большего влияния силового фактора в поверхностном слое формируется напряжения сжатия, а в нижележащих слоях – уравновешивающие их остаточные напряжения растяжения. Это объясняется пластическим деформированием поверхностного слоя и упругодеформированием предповерхностного слоя.

В случае преобладающего влияния температурного фактора на поверхностном слое образуются напряжения растяжения, а в нижних – напряжения сжатия. Это объясняется тем, что в поверхностном слое металл

стремится к увеличению объема, но встречает противодействие со стороны окружающего металла нижележащих слоев, что приводит к образованию напряжения сжатия [6].

В своих исследованиях процесса ортогонального резания низкоуглеродистой стали [7] Е. К. Хенриксен пришел к выводу, что деформация поверхностного слоя приводит к появлению остаточных напряжений. При этом доминирующую роль в процессе резания играет механическое воздействие. Он так же установил, что в пластичных материалах возникают растягивающие напряжения, а в хрупких материалах – сжимающие. На рис. 1 представлена схема ортогонального резания по Е. К. Хенриксен.

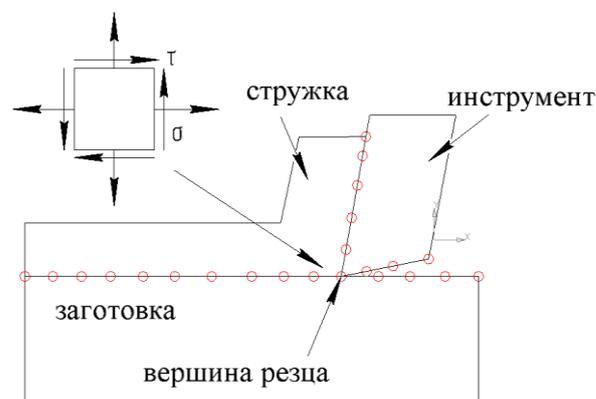


Рис. 1. Модель ортогонального резания

Выдвинутые им предположения были подтверждены результатами экспериментальных исследований [8]. Также сделан вывод, что нет соотношения между линейным тепловым расширением в обработанном слое и распределением остаточных напряжений. Основной причиной возникновения как растягивающих, так и сжимающих остаточных напряжений является механическое воздействие. К аналогичным выводам пришел К. Се. [9].

Исследования [8] показали, что длина плоскости сдвига является основным параметром, который регулирует механическое состояние поверхности (как для остаточных напряжений, так и для пластической деформации), поскольку он связан с фрикционными и сдвиговыми процессами удаления стружки.

Согласно модели процесса резания по Тиме толщина стружки (l_s) обратно пропорциональна углу сдвига (β) (рис. 2).

Подача влияет на угол сдвига независимо от скорости резания. Угол сдвига в свою очередь зависит от коэффициента трения. Чем меньше коэффициент трения, тем больше угол сдвига и лучше качество поверхности.

Для обеспечения качества поверхности необходимо подобрать оптимальный угол сдвига и коэффициент трения исходя из режимов резания.

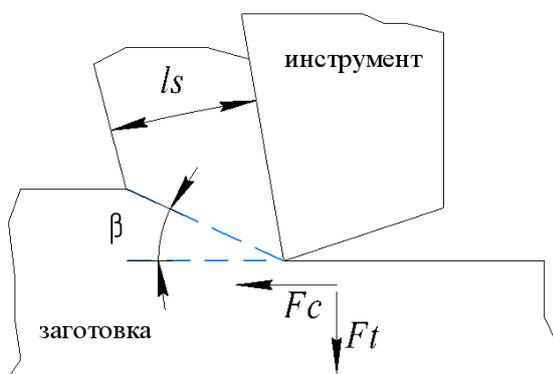


Рис. 2. Модель ортогонального резания [10]

Пластическая деформация металла поверхностного слоя изменяет все его механические свойства, в том числе уменьшает плотность, а следовательно, увеличивает объем [11]. Увеличению объема поверхностного слоя препятствуют недеформированные нижележащие слои. В результате в слое, прилегающем к поверхности, возникают сжимающие напряжения, а в нижележащих – напряжения растяжения.

В работе [12] проведены эксперименты по фрезерованию и определению влияния вида фрезерования на величину и характер распределения остаточных напряжений.

Автор указывает на причины возникновения сжимающих напряжений при обоих видах фрезерования (встречном и попутном) в зоне, находящейся в непосредственной близости от поверхностного слоя. При встречном фрезеровании давление сжатия оказывает зуб фрезы в момент подминания материала (рис. 3). Далее, на выходе зуба из материала резание сходит на нет, и также

происходит процесс подминания, но уже в меньшей степени.

При встречном фрезеровании равнодействующая внешних сил по отношению к обработанной поверхности расположена так же, как при точении, что должно приводить к появлению остаточных напряжений растяжения.

В случае попутного фрезерования равнодействующая внешних сил, в отличие встречного фрезерования, направлена на обработанную поверхность. Возникающие при этом пластически деформируемые слои металла с остаточными напряжениями сжатия не удаляются, а остаются на обработанной поверхности. При попутном фрезеровании зуб фрезы заканчивает резание с теоретически нулевой толщиной среза. В действительности, вследствие наличия скругления режущей кромки в зоне, где толщина среза близка к нулю, зуб фрезы не режет, а производит уплотнение поверхностного слоя, его удлинение, что способствует появлению остаточных напряжений сжатия.

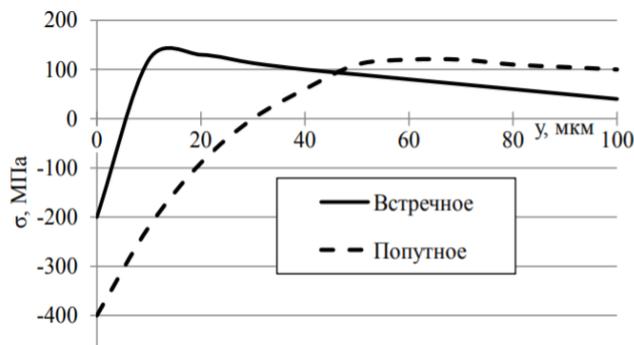


Рис. 3. Остаточные напряжения при попутном и встречном фрезеровании [12]

Необходимо отметить температурные напряжения, которые возникают даже при небольшой разнице температур. Если температурные напряжения в процессе нагрева будут выше предела упругости материала, то после снятия нагрева останутся остаточные напряжения из-за наличия остаточной деформации сжатия.

Рост остаточных напряжений происходит при низких температурах, когда модуль упругости материала и предел текучести возрастают. Надо учитывать объемные из-

менения в материале, связанные с фазовыми и структурными превращениями, которые определяются временем воздействия температуры [13]. Автор также указывает, что существуют два фактора, вызывающие остаточные напряжения – пластическая деформация при силовом воздействии и нагревание поверхностных слоев.

ВЛИЯНИЕ СОТС НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Применение СОТС [14] может способствовать как увеличению, так и уменьшению остаточных напряжений по сравнению с обработкой без СОТС. Характер влияния СОТС на технологические макронапряжения в значительной мере зависит от количества тепла, выделяемого в зоне резания, которое определяет развитие процессов разупрочнения в поверхностном слое, а следовательно, влияет на напряженность.

Охлаждающий эффект СОТС оказывает как положительное воздействие на технологические остаточные напряжения различного рода в поверхностном слое за счет влияния на тепловой баланс процесса резания, так и отрицательные, потому что интенсивное охлаждение поверхности заготовки приводит к образованию внутренних напряжений растягивания, что ухудшает эксплуатационные свойства детали.

Смазывающий эффект среды (при использовании СОТС с повышенными смазочными характеристиками) может улучшить большинство показателей обработки: снизить технологические остаточные напряжения вследствие лучшего экранирования трущихся поверхностей, локализовать сдвиговые деформации и снизить интенсивность адгезионных процессов.

Диспергирующее действие (на основе эффекта Ребиндера), связанное с уменьшением поверхностной энергии обрабатываемого материала при его резании с применением СОТС, может происходить вследствие адсорбции или хемосорбции молекул среды

или протекании химических реакций на его поверхности, что приводит к облегчению и локализации пластической деформации [15].

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В данном разделе рассматриваются работы, посвященные оценке влияния каждого из параметров режима резания на возникновение остаточных напряжений. В работе [16] проведены эксперименты по точению конструкционной легированной стали *AISI* 4340. Влияние подачи на остаточные напряжения зависит от скорости резания, состояния режущего лезвия, радиуса скругления, механических свойств обрабатываемой детали.

Величина и глубина залегания остаточных напряжений зависят от подачи (толщины срезаемого слоя), скорости резания, степени износа инструмента. При увеличении скорости резания абсолютная величина растягивающих остаточных напряжений увеличивается, но глубина их залегания уменьшается. При скоростях $V > 150\text{--}170$ м/мин образование поверхностного слоя (при обработке углеродистой стали) стабилизируется и скорость резания перестает оказывать влияние на остаточные напряжения.

Проводились эксперименты по точению стали 12Х2НВФА [17], которые показали, что с ростом скорости и подачи происходит сначала увеличение, а затем уменьшение абсолютных значений остаточных напряжений. Повышение связано с механизмом упрочнения материала при возрастании скорости деформирования в условиях относительно невысоких температур.

С дальнейшим ростом скорости резания повышается температура резания, обрабатываемый материал разупрочняется и снижаются силы резания. Это приводит к снижению остаточных напряжений как от снижения усилий воздействия резца на деталь, так и от температурного фактора (рис. 4, 5).

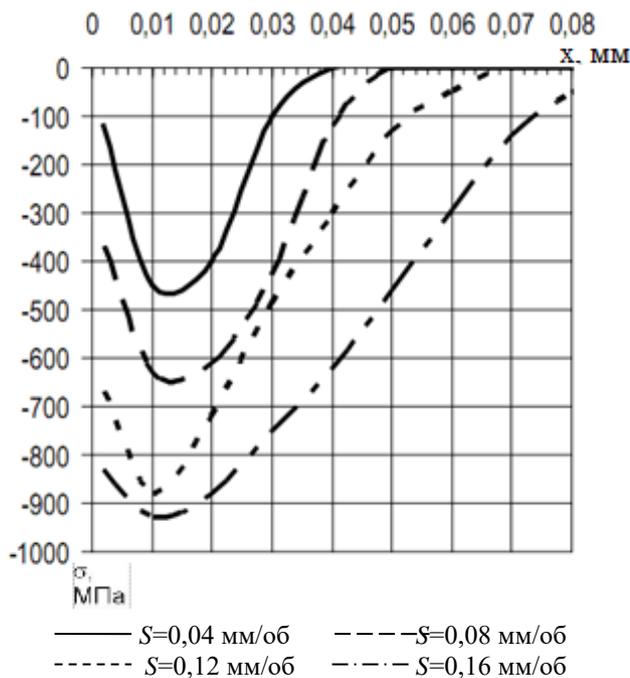


Рис. 4. Схема влияния подачи (S) на величину тангенциальных напряжений и глубину их залегания [18]

При точении сплава ХН62БМКТЮ [18] наиболее сильное влияние на остаточные напряжения оказывают подача и скорость резания. При $t > 0,5$ мм интенсивность влияния глубины резания на остаточные напряжения и деформации маложестких деталей уменьшается. Так, с увеличением глубины резания с 0,5 мм до 1,5 мм остаточные деформации образцов длиной 100 мм и толщиной 3,5 мм увеличиваются только на 10–15%, что указывает также на небольшое увеличение начальных и остаточных напряжений. С увеличением подачи (при точении) с 0,07 до 0,15 мм/об интенсивность ее влияния на величину и характер распределения остаточных напряжений уменьшается.

С уменьшением подачи от 0,15 мм/об. до 0,07 мм/об. величина остаточных напряжений снижается при сохранении характера эпюр распределения. При этом уменьшается разброс и увеличивается стабильность процесса формирования остаточных напряжений в различных зонах.

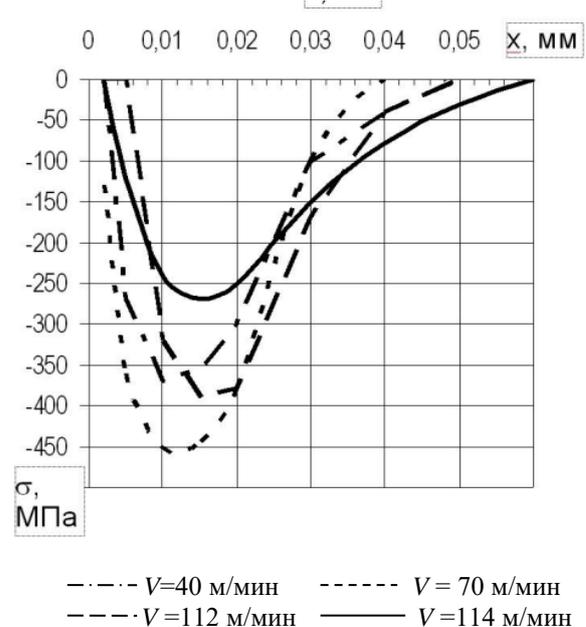


Рис. 5. Схема влияния скорости резания V на величину тангенциальных напряжений и глубину их залегания [18]

Рост подачи также увеличивает величину растягивающих напряжений, но при этом несколько растет и глубина их залегания [19].

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При ортогональном резании четыре элемента, а именно длина плоскости сдвига, износ инструмента, форма режущей кромки и глубина резания определяют структуру остаточных напряжений на обрабатываемой поверхности. Исследования в работе [20] показали, что износ инструмента приводит к увеличению температуры резания, что оказывает влияние на остаточные напряжения при механической обработке.

Исследования по точению закаленной стали [21], проводимые различными инструментами и на разных глубинах резания показали, что глубина резания не влияет на величину остаточных напряжений, а существенное влияние оказывает геометрия режущего инструмента.

Остаточные напряжения зависят от радиуса режущей кромки резца. Чем меньше радиус скругления режущей кромки, тем ниже величина максимальных остаточных напряжений [16].

Остаточные напряжения зависят и от переднего угла инструмента (рис. 6).

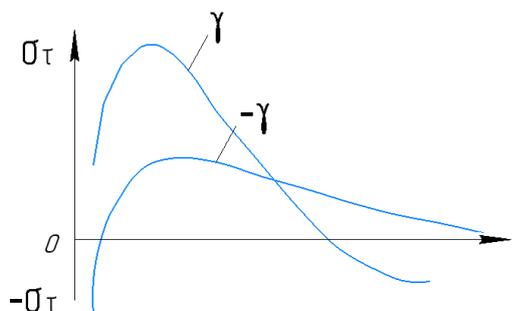


Рис. 6. Схема влияния переднего угла резца γ на величину тангенциальных напряжений и глубину их залегания

При переходе от положительных передних углов к отрицательным, до углов $\gamma = -15^\circ$, растягивающие напряжения резко уменьшаются, но одновременно увеличивается глубина их залегания.

Износ инструмента по задней поверхности повышает остаточные напряжения $\sigma_{\text{тmax}}$ и глубину их проявления. Наиболее стабильные значения $\sigma_{\text{тmax}}$ наблюдаются при работе на оптимальных скоростях резания [11].

Влияние радиуса при вершине резца на остаточные напряжения связано с изменением температуры резания. Повышение радиуса, при постоянной скорости резания снижает температуру и напряжения. При изменении радиуса и температуры значение напряжения практически постоянны.

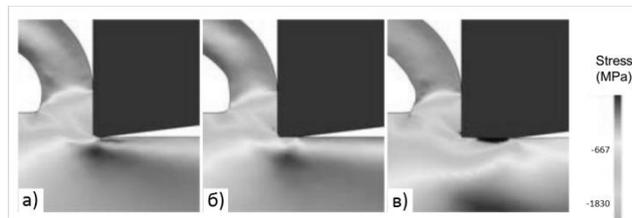


Рис. 7. Влияние износа инструмента на величину остаточных напряжений

а — распределение напряжений при резании инструментом без износа; *б* — распределение напряжений при резании инструментом с величиной износа инструмента 0,1 мм; *в* — распределение напряжения при резании инструментом с величиной износа инструмента 0,3 мм [5]

Результаты фрезерования алюминиевого сплава 7050-T7451 [22] показывают, что износ режущей кромки инструмента оказывает значительное влияние на профили остаточных напряжений, особенно поверхностных остаточных напряжений. По мере увеличения длины износа режущей кромки инструмента остаточные напряжения на обрабатываемой поверхности, очевидно, сдвигаются до предела растяжения, остаточные сжимающие напряжения ниже обрабатываемой поверхности увеличиваются, и толщина слоя остаточных напряжений также увеличивается. Величины и распределения остаточных напряжений тесно коррелируют с силами резания и температурным полем.

Анализ напряженно деформированного состояния поверхностного слоя инструмента в зоне локального контакта с обрабатываемым материалом [23] говорит о необходимости исследования не только поверхности обработанной детали, но и режущего инструмента.

МЕТОД КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК СПОСОБ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

На сегодняшний день существует большое количество работ в области моделирования процессов резания [7, 16, 24, 25]. Так, метод конечно-элементного анализа позволяет исследовать возникающие остаточные напряжения в объеме материала.

В работе А. Н. Болотеина [26] представлен анализ технологических остаточных напряжений, который показал, что можно определить наиболее подходящий вариант технологических условий обработки для тонкостенных деталей. Выявлена связь между технологическими условиями обработки и геометрической точностью детали на примере диска ротора компрессора авиационного газотурбинного двигателя.

В работе А. А. Александрова [27] разработана новая система компьютерного моделирования термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей.

Исследования моделирования процесса формирования поверхностного слоя детали при ее изготовлении [28] показали, что ис-

пользование комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием на предварительных этапах технологического процесса позволяет формировать достаточно большие по величине сжимающие технологические остаточные напряжения на глубине большей, чем величина припуска под последующую окончательную обработку (например, шлифование).

Кроме того, в исследованиях Е. С. Овсенко установлено, что основной причиной формирования технологических остаточных деформаций маложестких деталей типа дисков газотурбинных установок являются технологические наследственные остаточные напряжения и начальные напряжения, возникающие при обработке. В связи с этим были разработаны математические модели для расчета главной интегральной характеристики (площади эпюры) начальных радиальных и тангенциальных напряжений, которые возникают при торцовом точении, что позволяет определить рациональные условия обработки, обеспечивающие минимальные остаточные деформации. Также было установлено, что наибольшее влияние на начальные напряжения и остаточные деформации маложестких дисков при торцовом точении оказывают подача, величина износа резца, а также передний угол и радиус вершины резца [18].

Несмотря на большое количество работ в области компьютерного моделирования отсутствуют рекомендации по практическому использованию данного метода. Кроме того, задача моделирования трудоемка за счет необходимости учета многих параметров процесса резания, таких как СОТС, коэффициент трения между режущим инструментом и заготовкой, коэффициента теплообмена и др.

В связи с этим дальнейшие исследования влияния элементов режимов резания, геометрии режущего инструмента и других условий процесса резания на величину и уровень остаточных напряжений методом компьютерного моделирования, несмотря на имеющиеся сложности в реализации, представляется весьма актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С физической точки зрения, причиной возникновения остаточных напряжений является пластическая деформация металла в процессе обработки. При этом величина и распределение напряжений во многом также зависит от таких параметров, как неоднородное поле температур, структурно-фазовые превращения, неоднородность распределения деформации.

Результат анализа показал, что максимальные остаточные напряжения могут быть растягивающими или сжимающими в зависимости от режимов резания. Наиболее значимым параметром является величина подачи режущего инструмента, затем скорость и глубина резания. Также остаточные напряжения зависят от параметров режущего инструмента, а именно радиуса режущей кромки резца. Чем меньше радиус вершины инструмента, тем ниже величина максимальных остаточных напряжений.

Кроме того, тип и величина остаточных напряжений зависят от взаимодействия между механическими и тепловыми эффектами, в том числе и при использовании СОТС во время процесса резания.

Несмотря на значительный объем работ в области исследований остаточных напряжений отсутствуют рекомендации по назначению элементов режимов резания, геометрии инструмента, СОТС и др.

В связи с этим актуальным видится компьютерное моделирование, как один из методов неразрушающего и экономически эффективного контроля остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мухин В. С.** Поверхность. Технологические аспекты прочности деталей ГТД. М.: 2005. 295 с. [V. C. Mukhin, *Surface. Technological aspects of the strength of parts of the GTE*, (in Russian). Moscow, 2005.]
2. **Буркин С. П.** Остаточные напряжения в металлорудности: учебное пособие, Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. С. 12 [S. P. Burkin, *Residual Stresses in Metal Modification*, (in Russian). Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2015.]
3. **Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д.** Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989 [Ya. D. Vishnyakov, V. D. Piskarev, *Control of residual stresses in metals and alloys*, (in Russian). M.: Metallurgy, 1989.]

4. **Исследование** влияния показателей рассеяния энергии в процессе резания на интенсивность изнашивания инструмента / Постнов В. В. и др. // *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 35 [V. V. Postnov, et. al., "Investigation in the influence of the energy dissipation factors during cutting on the tool-wear rate", (in Russian), in *Aviacionnaya promyshlennost'*, no. 2, pp. 35-40, 2015.]
5. **Analysis** of residual stress and work-hardened profiles on Inconel 718 when face turning with large-nose radius tools / Madariaga A. et. al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* P.268–270 [A. Madariaga, et. al., "Analysis of residual stress and work-hardened profiles on Inconel 718 when face turning with large-nose radius tools" pp. 268-270.]
6. **Процессы** формообразования деталей в машиностроении / Кишуров В. М. и др. // М.: Машиностроение, 2015. 496 с. [V. M. Kishurov, et. al., *The processes of forming parts in mechanical engineering*, (in Russian). M: Mashinostroenie, 2015.]
7. **Henriksen E. K.** Residual Stresses in Machined Surfaces // American Society of Mechanical Engineers. 1951. №73 (1): pp. 69-76.
8. **Liu C. R., Barash M. M.** The mechanical state of the sub-layer of a surface generated by chip-removal process – Part 1: Cutting with a sharp tool // *J. Manuf. Sci. Eng.* 1976. №98: pp. 1192–1199.
9. **Xie Q.** A Study on Residual Stresses and Tool Wear Induced by the Machining Process., in NAMRC XVII. 1989: SME.
10. **Liu C. R., Barash M. M.** Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface // *Journal of Engineering for Industry*. 1982. № 104 (3). Pp. 257–264.
11. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М: Машиностроение, 1997. 278с. [A. D. Makarov, *Optimization of cutting processes*, (in Russian). M: Mashinostroenie, 1997.]
12. **Елкин М. С.** Исследование влияния износостойких покрытий режущего инструмента на параметры качества обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами лопаток и моноколес ГТД: дисс. канд. техн. наук. Рыбинск, 2015. 205 с. [M. S. Elkin, *Study of the effect of wear-resistant coatings of the cutting tool on the quality parameters of the machined surface when milling blades end blades and GTE monowheels* Phd. Rybinsk, 2015. 205 p.]
13. **Биргер И. А.** Остаточные напряжения. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 232 с. [I. A. Birger, *Residual stress*, (in Russian). Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashi-nostroitel'noj literatury, 1963.]
14. **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). M.: Mashinostroenie, 1973.]
15. **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 [P. P. Chernikov, S. V. Starovoytov, B. U. Sharipov, "Influence of external conditions and sots on the physical and mechanical properties of the contact of instrumental and processed materials", (in Russian), in *STIN*, no. 11, p. 34, 2011.]
16. **Sadat A. B., Bailey J. A.** Residual Stresses in Turned AISI 4340 Steel // *Experimental Mechanics*. 1987. № 27 (1): p. 80–85.
17. **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.]
18. **Овсенко Е. С.** Обеспечение качества изготовления маложестких деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций: дисс. канд. техн. наук. Москва, 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.]
19. **Бобров В. Ф.** Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с. [V. F. Bobrov, *Fundamentals of the theory of cutting metals*. (in Russian). M: Mashinostroenie, 1975.]
20. **Liu, C. R., Barash M. M.,** Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface // *Journal of Engineering for Industry*. 1982. № 104 (3). Pp. 257-264.
21. **Jacobson M.** Surface Integrity of Hard-Turned M50 Steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 2002. № 216(1): pp. 47-54.
22. **Z. T. Tangab,** et. al. The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy // *Journal of Materials processing technology* v. 209, issue 9, pp. 4502-4508.
23. **Хадидуллин С. Х.** Повышение эффективности использования инструментальных твердых сплавов на основе прогнозирования их режущих свойств: дисс. канд. техн. наук. Рыбинск, 2011. 148 с. [S. Kh. Khadiullin, *Improving the efficiency of the use of instrumental hard alloys based on the prediction of their cutting properties*: Phd. Rybinsk, 2011. 148 p.]
24. **Анализ** программных средств для моделирования процесса резания при оценке эффекта высокоскоростной обработки / И. А. Глухов и др. // *Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий*. Уфа: УГАТУ. 2001. Т. 1. С. 29–35. [I. A. Glukhov, et. al., "Analysis of software tools for modeling the cutting process in assessing the effect of high-speed processing", (in Russian), in *Sovremennye tendencii v tekhnologiyah metalloobrabotki i konstrukciyah metalloobrabatyvayushchih mashin i kom-plektuyushchih izdelij*, vol. 1, pp. 29-35, 2017.]
25. **Мухин В. С., Зориктуев В. Ц.** Остаточные напряжения и наклеп при торцовом точении // *Вестник машиностроения*. 1974. № 1. С. 60. [V. S. Mukhin, V. Sc. Zoriktuev, "Residual stresses and work hardening in face turning", (in Russian), in *Vestnik Mashinostroeniya*, no. 1, pp. 60, 1974.]
26. **Болотеин А. Н.** Расчетное определение технологических остаточных напряжений на основе конечно-элементной модели процесса резания: дисс. канд. техн. наук. Рыбинск, 2014. 183 с. [A. N. Bolotein, *The calculated definition of technological residual stresses on the basis of a finite element model of the cutting process*: Phd: Rybinsk, 2014. pp. 183.]
27. **Александров А. А.** Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: дисс. канд. техн. наук: Иркутск, 2016. 165 с. [A. A. Alexandrov, *Simulation of thermal residual stresses in the production of low-rigid parts*: Phd: Irkutsk, 2016. 165 p.]
28. **Благовский О. В.** Управление формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изго-

товлении с использованием ультразвуковых колебаний: дисс. канд. техн. наук: Ульяновск, 2015. 151 с. [O. V. Blagovskiy, *Controlling the formation of residual stresses in critical parts during their manufacture using ultrasonic vibrations*: PhD: Ulyanovsk, 2015. pp. 151.]

KHADIULLIN, Salavat Khakimovich, PhD, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2011).
CHERNIKOV, Petr Petrovich, PhD, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UAI, 1980).

ОБ АВТОРАХ

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

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

СТАРОВОЙТОВ Семен Владимирович, доц. каф. АТП. Дипл. инженер (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. механообработки.

ХАДИУЛЛИН Салават Хакимович, доц. каф. АТП. Дипл. инженер (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. термодинамических процессов, синергетики, компьютерного моделирования процессов резания, мехатроника.

ЧЕРНИКОВ Петр Петрович, доц. каф. АТП. Дипл. инженера УАИ (1980). Исследования в области механообработки.

METADATA

Title: Analysis of causes and sources of occurrence of residual stress.

Authors: R. R. Basharov¹, L. R. Kilmetova², S. V. Starovoytov³, S. Kh. Khadiullin⁴, P. P. Chernikov⁵

Affiliation:

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

³ Technopark of Aviation Technologies, Russia.

Email: ¹rash@mail.ru, ²kilmetovalr@gmail.com, ³sv_starov@mail.ru, ⁴salavathh@gmail.com, ⁵chernikov@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 3-11, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In the framework of identifying the causes of residual stresses, a literature review of foreign and domestic literature was conducted, which showed a variety of research conducted: analytical and empirical. Studies have been carried out for different types of machining: turning and milling. The article describes the influence of the elements of cutting modes: speed, feed and depth of cut, the geometry of the cutting tool, as well as its wear as possible causes of residual stresses. The occurrence of compressive or tensile stresses depending on the material of the work piece is considered.

Key words: residual stress; cutting conditions; cutting tool; lubricating and cooling technological means (LCTM).

About authors:

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

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

STAROVOYTOV Semen Vladimirovich, Postgrad. Student, Dept. of Automated Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2012).