

УДК 621.941.08
Код ГРНТИ 55.19.03

doi 10.54708/19926502_2026_30211274

Влияние режимов резания на формирование остаточных напряжений при точении ЭИ698-ВД

А.Р. Сайдуганов, А.А. Сазанов*, Р.А. Мунасыпов, П.П. Черников, В.Р. Мухамадеев

Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ), г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. В исследовании проанализировано влияние режимов резания (скорость, подача, постоянная глубина резания) на формирование поверхностных остаточных напряжений (ПОН) в жаропрочном никелевом сплаве ЭИ698-ВД. Ключевые результаты: скорость резания ($V = 15\text{--}55$ м/мин) определяет глубину и характер остаточных напряжений. Подача режущего инструмента ($S = 0,075\text{--}0,2$ мм/об) влияет на тип остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжение, точение, режим резания.

*aasazan23@gmail.com

Введение

Современные требования к авиационным двигателям непрерывно ужесточаются: от них ожидают высочайшей надежности, увеличенного ресурса работы, повышенной топливной эффективности и сниженной массы при сохранении прочностных характеристик [1–4]. Эти требования предопределяют необходимость системной оптимизации всех этапов жизненного цикла изделия – от эскизного проектирования до серийного производства и эксплуатации.

Ключевым фактором, во многом определяющим эксплуатационные свойства деталей газотурбинных двигателей (ГТД), выступают остаточные напряжения (ОН), возникающие в материале в результате технологических воздействий [5, 6]. С одной стороны, сформированные остаточные напряжения сжатия способны повышать усталостную прочность [7–10], увеличивать сопротивление коррозионному разрушению [11], замедлять развитие микротрещин [12], улучшать износостойкость поверхностного слоя [13, 14]. С другой стороны, неблагоприятно распределенные остаточные напряжения (особенно растягивающие) могут инициировать раннее разрушение конструкции [1], провоцировать образование трещин при циклических нагрузках, снижать фактический запас прочности детали [15].

Поэтому на этапе технологической подготовки производства важно обеспечить прогнозирование характера и величины остаточных напряжений для конкретных материалов и операций [16, 17], управление формированием ОН путем выбора оптимальных режимов обработки [2], контроль фактического распределения напряжений в готовых деталях [3]. Особую значимость это имеет для высоконагруженных элементов ГТД (дисков, лопаток, валов), работающих в условиях комплексных термомеханических нагрузок. Для таких деталей именно поверхностный слой, где концентрируются остаточные напряжения, во многом определяет ресурс и надежность всего узла [18, 19].

Одним из важных завершающих этапов механической обработки деталей ГТД является лезвийная обработка, существенно влияющая на физико-механическое состояние поверхностного слоя. Процесс резания сопровождается интенсивным пластическим деформированием материала, выделением значительного количества тепла в зоне контакта, сложными термомеханическими взаимодействиями между инструментом и заготовкой [10, 20].

Эти факторы напрямую определяют характер формирования остаточных напряжений – их величину, знак (сжатие/растяжение) и глубину залегания.

Цель настоящего исследования – изучить влияние режимов резания (скорости V , подачи S и глубины t) на формирование ПОН в сплаве ЭИ698-ВД, применяемом в авиадвигателестроении.

В работе решаются следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать распределение осевых остаточных напряжений при различных режимах точения.
2. Оценить влияние скорости резания и величины подачи на величину и глубину залегания ОН.
3. Проанализировать взаимосвязь между температурно-силовыми условиями в зоне резания и характером формирования остаточных напряжений.

Объектом исследования являются цилиндрические образцы из сплава ЭИ698-ВД ($\varnothing 30 \times 100$ мм), обрабатываемые точением с различными режимами резания. Для измерения остаточных напряжений применяется метод Давиденкова, обеспечивающий точность не ниже 5% [4].

Полученные результаты позволят усовершенствовать технологические процессы обработки деталей ГТД, обеспечив заданное распределение остаточных напряжений и, как следствие, повысить надежность и ресурс авиационных двигателей.

Методика исследования.

Исследуемые режимы резания

В настоящей работе для отработки технологических режимов решено использовать образцы из сплава ЭИ698-ВД в виде цилиндров с размерами $\varnothing 30 \times 100$ мм на длине 65 мм (Рис. 1). Для экспериментов выбраны наиболее характерные для сплава режимы обработки по скорости резания (V , м/мин) и по подаче режущего инструмента (S , мм/об.) (Табл. 1), относительно оптимального режима скорость резания $V = 30$ м/мин, подача $S = 0,1$ мм/об, при точении резцом 1105, глубина резания t во всех случаях была 0,5 мм. Геометрия режущего инструмента: главный задний угол $\alpha = 6^\circ$; передний угол $\gamma = 0^\circ$; главный угол в плане $\phi = 45^\circ$; вспомогательный угол в плане $\phi_1 = 45^\circ$; радиус при вершине $r = 0,2$ мм. Сила резания измерялась динамометра УДМ-600. Температура в зоне контакта определялась с помощью метода естественной термопары [21, 22].

Таблица 1. Режимы точения.

№ п/п	V , м/мин	C_v	S , мм/об	C_s
1	15	0,5	0.1	1
2	20	0,6667	0.1	1
3	25	0,8333	0.1	1
4	30	1	0.1	1
5	45	1,5	0.1	1
6	55	1,8333	0.1	1
7	30	1	0.075	0,75
8	30	1	0.09	0,9
9	30	1	0.125	1,25
10	30	1	0.15	1,5
11	30	1	0.175	1,75
12	30	1	0.2	2

Метод измерения остаточных напряжений

Для определения осевых напряжений и построения их эпюры по глубине распределения применялся прибор ПИОН (Рис. 1 (а, б)). С поверхности цилиндрических образцов, обработанных на различных режимах, вырезали полоску размером $2 \times 4 \times 50$ мм (Рис. 1 (в)) и измеряли ее прогиб по мере постепенного электрохимического удаления слоев

с напряженной поверхности по методу Давиденкова [5]. Погрешность измерения, связанная с поперечной кривизной полосы (Рис. 1 (в)), не превышает 5% [5].

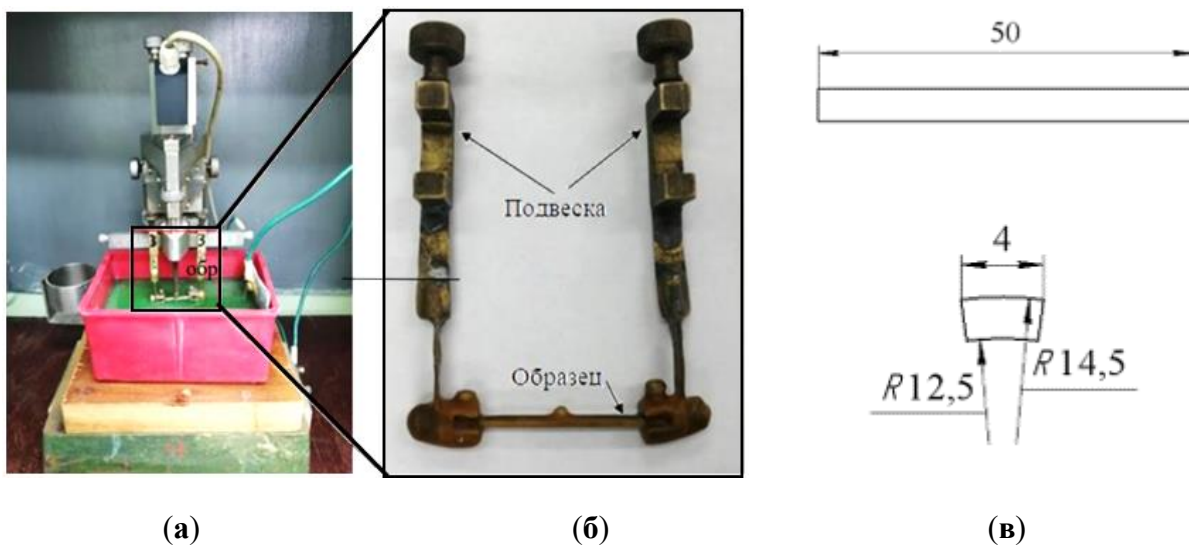


Рисунок 1. Внешний вид измерительного блока ПИОН-2Т (а), способ закрепления образца (б), форма и геометрия образца (в).

Результаты

В результате проведенных исследований и обработке полученных данных определено, что характер влияния элементов режима резания на формирование температуры в зоне резания (Рис. 2) и интенсивность сил резания (Рис. 3) аналогичен результатам, описанным в работах других исследователей [3, 23].

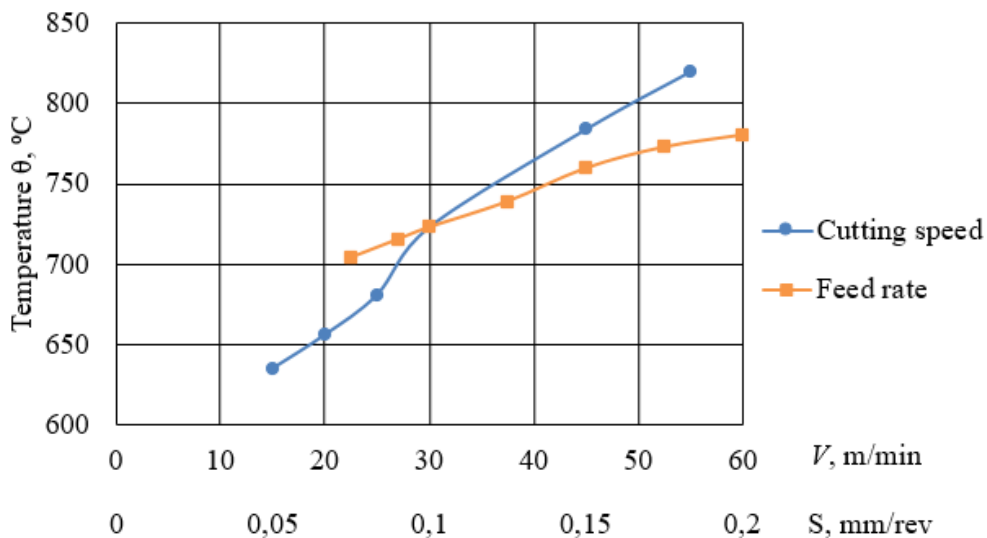


Рисунок 2. Влияние элементов режима резания на температуру в зоне резания при изменении скорости резания и подачи режущего инструмента резания.

Прирост температуры в зоне резания при увеличении скорости в 1,9 раза выше, чем при увеличении величины подачи режущего инструмента $\frac{K_V}{K_S} = 1,9$:

$$K_V = \frac{\theta_6 - \theta_1}{C_{V6} - C_{V1}} = 138,75 \quad (1)$$

$$K_S = \frac{\theta_{12} - \theta_7}{C_{S12} - C_{S7}} = 72,67 \quad (2)$$

Сила резания постепенно снижается (Рис. 3) с увеличением скорости резания. Кривая имеет плавный нисходящий характер. Сила резания возрастает с увеличением подачи, кривая (Рис. 3) имеет восходящий характер, особенно заметный при подаче выше 0,1 мм/об, увеличение подачи приводит к росту силы резания из-за увеличения площади контакта инструмента с материалом. Прирост силы резания с увеличением подачи в 13,8 раза выше, чем ее снижение с увеличением скорости резания $\frac{B_S}{|B_V|} = 13,8$.

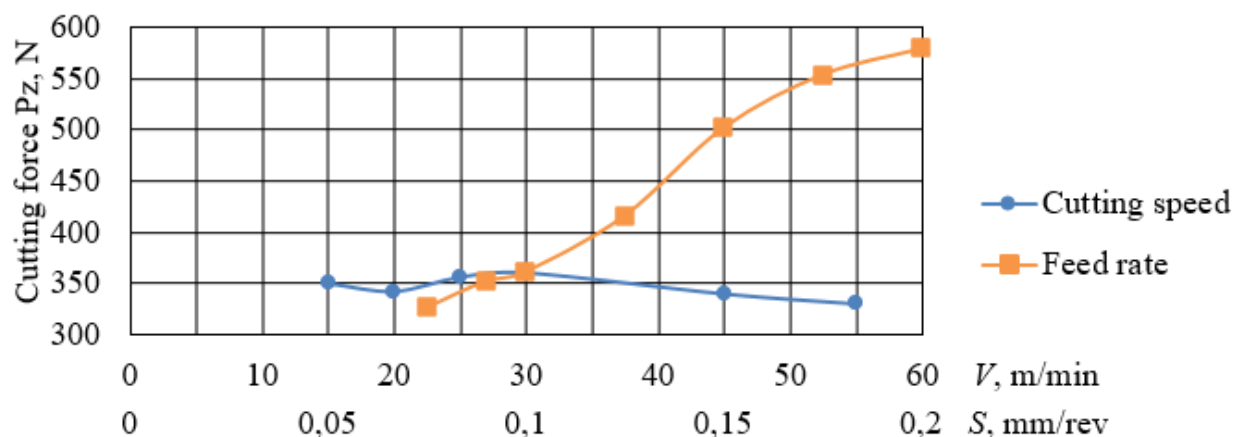


Рисунок 3. Влияние элементов режима резания на силу резания при изменении скорости резания и подачи режущего инструмента.

$$B_V = \frac{P_{Z6} - P_{Z1}}{C_{V6} - C_{V1}} = -14,625 \quad (3)$$

$$B_S = \frac{P_{Z12} - P_{Z7}}{C_{S12} - C_{S7}} = 201,84 \quad (4)$$

На Рис. 4 представлены результаты измерения остаточных напряжений по глубине их залегания на образцах, обработанных в диапазоне скоростей от 15 до 55 м/мин.

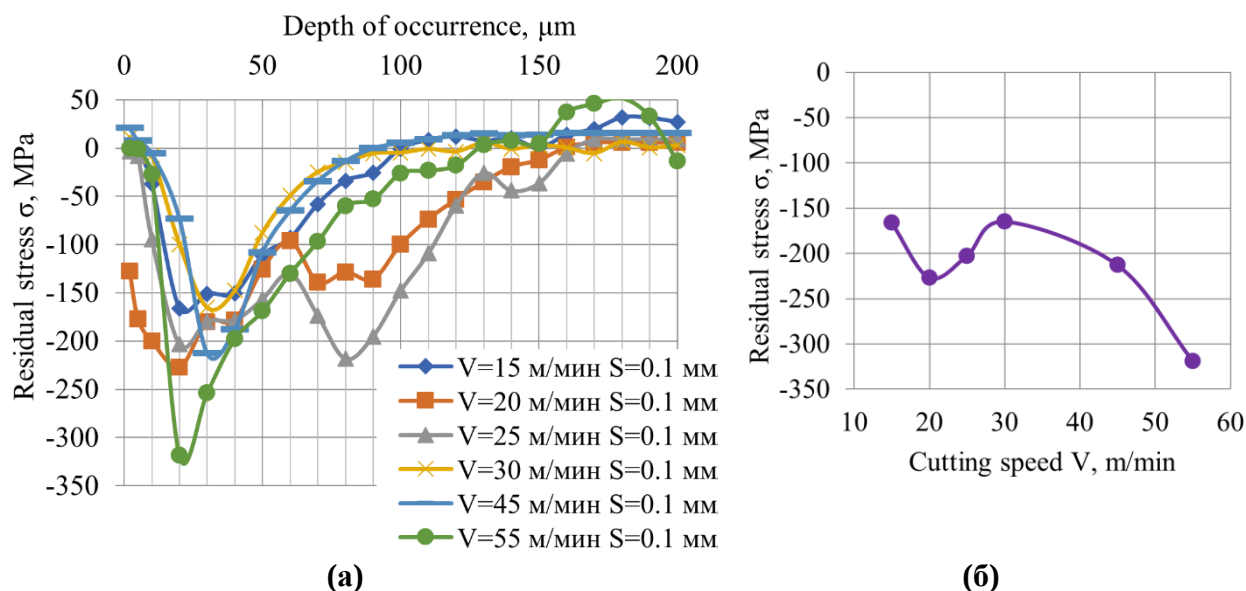
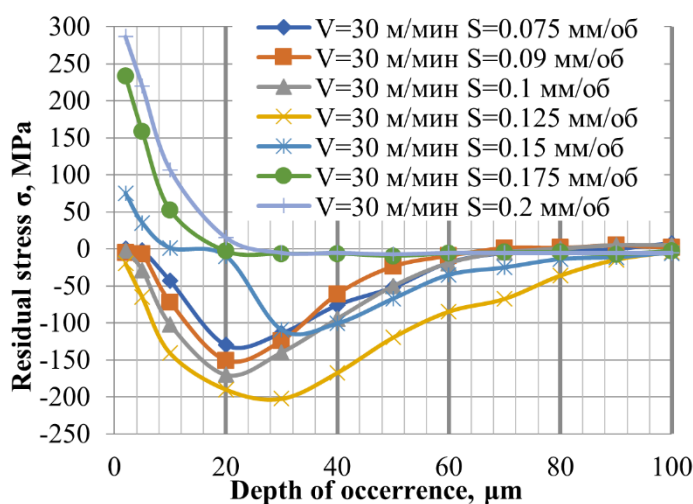


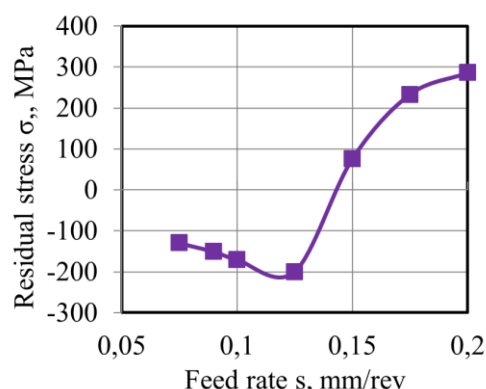
Рисунок 4. Распределения остаточных напряжений по глубине от поверхности при различных скоростях резания (а) и изменение остаточных напряжений при изменении скорости резания (б).

В этом диапазоне образуются ПОН сжатия в пределах 150–240 МПа, однако при скоростях $V = 20$ и 25 м/мин заметно распространение напряжений вглубь до 100 мкм от поверхности, что не наблюдается на других скоростях. Отсутствие распространения ПОН на низкой скорости резания ($V = 15$ м/мин) обуславливается низкой температурой резания 610°C (Рис. 3 (а)), при скоростях резания $V = 30$ – 55 м/мин и температурой в зоне резания 710 – 820°C (Рис. 3 (а)), наблюдается локализация остаточных напряжений сжатия на глубине их залегания 20–40 мкм, что можно объяснить высокой скоростью перемещения резца вдоль образца, из-за быстрого перемещения зоны контакта внутренние слои заготовки не прогреваются достаточно для образования высоких остаточных напряжений сжатия.

При резании на малых подачах процесс формирования поверхностного слоя может быть сравним с процессом выглаживания или обкатки. При поверхностном упрочнении деталей машин в этих условиях, в осевом направлении в верхнем горизонте всегда формируются сжимающие напряжения (Рис. 5, для $S = 0,075$ – $0,125$ мм/об).



(а)



(б)

Рисунок 5. Распределения остаточных напряжений по глубине от поверхности на различных подачах режущего инструмента и их зависимость от подачи.

При точении на подачах $S = 0,15$ – $0,2$ мм/об, формирование остаточных осевых напряжений связано с наклепом металла поверхностного слоя под воздействием высокой силы резания и температуры в направлении подачи (Рис. 2, 3).

Заключение

В ходе проведенного исследования изучено влияние режимов резания (скорости, подачи и постоянной глубины резания) на формирование поверхностных остаточных напряжений в жаропрочном никелевом сплаве ЭИ698-ВД в результате чего установлено:

1. Влияние скорости резания ($V = 15$ – 55 м/мин): при скоростях $V = 15$ – 45 м/мин формируются ПОН сжатия в диапазоне 150–240 МПа; при $V = 20$ – 25 м/мин наблюдается распространение напряжений вглубь до 100 мкм от поверхности; при $V = 30$ – 55 м/мин (температура в зоне резания 710 – 820°C) остаточные напряжения сжатия локализуются на глубине 20–40 мкм из-за быстрого перемещения зоны контакта, не позволяющего внутренним слоям достаточно прогреться.

2. Влияние подачи режущего инструмента ($S = 0,075$ – $0,2$ мм/об): при малых подачах процесс формирования поверхностного слоя близок к выглаживанию/обкатке, что приводит к образованию сжимающих напряжений в верхнем горизонте; при увеличенных подачах ($S = 0,1$ – $0,2$ мм/об) формирование остаточных осевых напряжений связано с наклепом металла под воздействием высокой силы резания и температуры.

3. Характер ПОН зависит от температурно-силовых условий: температуры в зоне резания и силы резания. Метод естественной термопары и измерения силы резания подтвердили эту зависимость.

4. Полученные данные позволяют прогнозировать распределение остаточных напряжений для конкретных режимов обработки; выявленные закономерности дают возможность выбирать параметры резания, обеспечивающие требуемое распределение остаточных напряжений сжатия, что повышает эксплуатационные характеристики детали; результаты исследования могут быть использованы для совершенствования технологических процессов обработки высоконагруженных элементов газотурбинных двигателей (дисков, лопаток, валов), работающих в условиях комплексных термомеханических нагрузок.

Таким образом, управление элементами режима резания (скорость и подача) является эффективным инструментом регулирования уровня и глубины залегания остаточных напряжений, что важно для обеспечения ресурса авиационных двигателей.

Литература:

1. Сайдуганов А.Р., Сазанов А.А. Мониторинг параметров электропривода оборудования и ТЭДС процесса резания для прогнозирования ПОН с помощью АИС «Диспетчер». В сб.: Мавлютовские чтения: Материалы XVIII Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа, 25–29 ноября 2024 года. В 9-ти томах. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. С. 299–304. [Saiduganov A.R., Sazanov A.A. Monitoring the parameters of the equipment electric drive and the TEMF of the cutting process to predict the surface residual stresses using the AIS “Dispatcher”. In: Mavlyutov Readings: Proceedings of the XVIII All-Russian Youth Scientific Conference. Ufa, November 25–29, 2024. In 9 volumes. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2025. P. 299–304 (in Russian)]. EDN JNTKMP.
2. Сазанов А.А., Исмагилов Т.Р., Кильметова Л.Р. и др. Прогнозирование возникновения остаточных напряжений и обеспечение их измерения посредством контроля температурно-силовых параметров в процессе точения. В сб.: Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 16–17 ноября 2023 года. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. С. 25–34. [Sazanov A.A., Ismagilov T.R., Kilmetova L.R., et al. Predicting the occurrence of residual stresses and ensuring their measurement by monitoring temperature-force parameters during the turning process. In: Machine tool building and innovative mechanical engineering. Problems and growth points: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference, Ufa, November 16–17, 2023. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2024. P. 25–34 (in Russian)]. EDN CUKRGI.
3. Сергеев А.С., Тихонова Ж.С., Тихонова Д.С. Повышение точности расчета составляющих силы резания при токарной обработке коррозионностойких сталей // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. 2016. № 23. С. 72–76. [Sergeev A.S., Tikhonova Zh.S., Tikhonova D.S. Improving the accuracy of calculating the cutting force components during turning of corrosion-resistant steels // Novoye Slovo v Nauke i Praktike: Gipotezy i Aprobatsiya Rezul'tatov Issledovaniy. 2016. No. 23. P. 72–76 (in Russian)]. EDN VVCAEB.
4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12. [Kablov E.N. Aviation materials science: results and prospects // Vestnik Rossiyskoi Akademii Nauk. 2002. Vol. 72. No. 1. P. 3–12 (in Russian)].
5. Давиденков Н.Н. Проблемы механического испытания материалов // Заводская лаборатория. 1935. Т. 4. № 1. С. 3–15. [Davidenkov N.N. Problems of mechanical testing of materials // Zavodskaya Laboratoriya. 1935. Vol. 4. No. 1. P. 3–15 (in Russian)].
6. Buyrukoğlu S., Kesriklioglu S. Comparison of ensemble and base learner algorithms for the prediction of machining induced residual stresses in turning of aerospace materials // Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2022. Vol. 11. No. 3. P. 861–879.

7. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29–32. [Pavlov V.F. On the relationship between residual stresses and the fatigue limit during bending under stress concentration conditions // Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie. 1986. No. 8. P. 29–32 (in Russian)].
8. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с. [Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakulyuk V.S. Prediction of fatigue resistance of surface-hardened parts based on residual stresses. Samara: Samara Research Center of RAS, 2012. 125 p. (in Russian)].
9. Павлов В.Ф., Филатов А.П., Шадрин В.К., Чирков А.В. Выбор оптимальных режимов ультразвукового упрочнения образцов из сплава ЭИ698 по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. Т. 15. № 4(44). С. 81–85. [Pavlov V.F., Filatov A.P., Shadrin V.K., Chirkov A.V. Ultrasonic hardening of specimens made of ЭИ698 alloy optimal regimes choice using average integral residual stresses criterion // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2012. Vol. 15. No. 4(44). P. 81–85 (in Russian)].
10. Chiocca A., Frendo F., Bertini L. Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components // Procedia Structural Integrity. 2022. Vol. 38. P. 447–456.
11. Takakuwa O., Soyama H. Effect of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel // Advances in Chemical Engineering and Science. 2015. Vol. 05. No. 01. P. 62–71.
12. Mirsayapov R.R., Valeev I.S. Effect of residual stress on crack initiation and propagation in titanium alloys // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. P. 1854–1860.
13. Lin Y.C., Chen X.M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. No. 6. P. 934–942.
14. Liu Z., Wang H., Li X. et al. Surface integrity and wear resistance of hard turned AISI 52100 steel under different cutting conditions // Wear. 2017. Vol. 376–377. P. 84–93.
15. Majzoobi G.H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 // Materials Science and Engineering: A. 2009. Vol. 516. No. 1–2. P. 235–247.
16. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых гладких деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2012. № 3. С. 102–109. [Kirpichev V.A., Bukaty A.S., Chirkov A.V. Prediction of fatigue resistance of surface-hardened smooth parts // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhsky Region. 2012. No. 3. P. 102–109 (in Russian)].
17. Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С., Букатый А.С. и др. Зависимость предела выносливости от характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое упрочнённых деталей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5. С. 180–187. [Kirpichyov V.A., Vakulyuk V.S., Bukaty A.S. Dependence of the endurance limit on the character of residual stresses distribution in the surface layer of hardened parts // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2014. No. 5. P. 180–187].
18. Pape F., Coors T., Poll G. Studies on the influence of residual stresses on the fatigue life of rolling bearings in dependence on the production processes // Frontiers in Mechanical Engineering. 2020. Vol. 6. Art. no. 56.
19. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с. [Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneiderovich R.M. Bearing capacity and strength calculation of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 488 p. (in Russian)].

20. Kanakaraju V., Hassan F., Rathinam K., Gavendra Norkey. Numerical analysis of surface integrity in parallel turning process. Part I: Influence of cutting tool parting distance // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 872. No. 1. Art. no. 012085.
21. Петрушин С.И., Федоренко Ю.П., Тимофеев В.Н. Особенности формирования остаточных напряжений при обработке жаропрочных сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 8. С. 22–27. [Petrushin S.I., Fedorenko Yu.P., Timofeev V.N. Features of the formation of residual stresses during the processing of heat-resistant alloys // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov. 2015. No. 8. P. 22–27 (in Russian)].
22. Grzesik W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.
23. Bai W., Bisht A., Roy A., et al. Effect of hybrid machining on structural integrity of aerospace-grade materials // Procedia CIRP. 2018. Vol. 77. P. 163–166.

Благодарности / Acknowledgments:

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № FRRR-2026-0005 «Исследование новых материалов покрытий, полученных методом ассистированного вакуумно-дугового осаждения, для упрочнения металлорежущих инструментов из твердого сплава применяемых для обработки материалов авиадвигателестроительной отрасли».

The study was carried out with the financial support of state assignment No. FRRR-2026-0005 “Study of new coating materials obtained by the method of assisted vacuum-arc deposition for strengthening metal-cutting tools made of hard alloy used for processing materials in the aircraft engine industry.”

Об авторах:

САЙДУГАНОВ Андрей Радионович, ассистент кафедры АТП, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», andrewsai@mail.ru, Science Index AuthorID: 882955.

САЗАНОВ Андрей Александрович, аспирант, инженер кафедры АТП, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 108409@stud.uust.ru, Science Index AuthorID: 1294414.

МУНАСЫПОВ Рустем Анварович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры АТП, rust40@mail.ru.

ЧЕРНИКОВ Петр Петрович, к.т.н, доцент, доцент кафедры АТП, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», chernikov.pp@ugatu.ru, Science Index AuthorID: 693368.

МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович, старший преподаватель кафедры технология машиностроения, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, vener_muhamadeev@mail.ru.

Metadata:

Title: Influence of cutting mode on the formation of residual stresses in EI698-VD turning

Author 1: Andrei Radionovich Saiduganov, Assistant Lecturer of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic Bashkortostan, Russia, andrewsai@mail.ru, Science Index AuthorID: 882955.

Author 2: Andrei Alexandrovich Sazanov, postgraduate student, engineer of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic Bashkortostan, Russia, 108409@stud.uust.ru, Science Index AuthorID: 1294414, ORCID: 0009-0000-1663-011X.

Author 3: Rustem Anvarovich Munasypov, Dr. of Tech. Sci. Professor, Professor of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic Bashkortostan, Russia, rust40@mail.ru.

Author 4: Petr Petrovich Chernikov, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Automation of Technological Processes, Ufa University of Science and

Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic Bashkortostan, Russia, chernikov.pp@ugatu.su, Science Index AuthorID: 693368.

Author 5: Vener Rifkatovich Mukhamadeev, Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic Bashkortostan, Russia, vener_muhamadeev@mail.ru.

Abstract: The study analyzes the effect of cutting modes (speed, feed, constant cutting depth) on the formation of surface residual stresses in the heat-resistant nickel alloy EI698-VD. Key results: The cutting speed ($V = 15\text{--}55$ m/min) determines the depth and nature of the residual stresses. The feed of the cutting tool ($S = 0.075\text{--}0.2$ mm/rpm) affects the type of residual stresses.

Keywords: residual stress, turning, cutting mode.