

## Исследование температуры концевого фрезерования низколегированной стали в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях

© 2024

*Расторгуев Дмитрий Александрович*<sup>1</sup>, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

*Севастьянов Александр Александрович*<sup>\*2</sup>, аспирант  
кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

*Клевцов Геннадий Всеволодович*, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

\*E-mail: alex-119977@yandex.ru,  
a.sevastyanov@ttsu.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7465-650X>

Поступила в редакцию 05.07.2023

Принята к публикации 29.01.2024

**Аннотация:** Представлены результаты исследования температуры концевого фрезерования низколегированной стали в зависимости от режимов резания и типа кристаллической структуры. Эксперимент проводился на универсальном фрезерном станке PROMA FHV-50PD. Обработку заготовок осуществляли твердосплавной фрезой 12-12D-30C-75L-4F HRC55. В ходе обработки охлаждение не использовалось. Полученные данные подвергались статистическому анализу с целью выявления зависимости температуры концевого фрезерования низколегированной стали от режимов обработки и кристаллической структуры стали. При создании математической модели температуры резания проводился бутстреп-анализ для определения значимости параметров режимов обработки. Выбор математической модели производился с использованием информационного критерия Акаике. Обнаружено, что математические модели зависимости температуры от режимов обработки для обоих типов кристаллической структуры включают глубину резания во второй степени. При этом для стали в ультрамелкозернистом состоянии статистически значима не только глубина резания, но и подача. Влияния скорости резания на температуру в исследуемом диапазоне режимов обработки обнаружить не удалось. Таким образом, при обработке фрезерованием данной группы материалов преобладающее влияние на температурный режим оказывает силовая составляющая, в первую очередь определяемая глубиной резания. Уровень температуры резания при обработке стали в ультрамелкозернистом состоянии в целом выше, чем при обработке стали в крупнозернистом состоянии, что должно быть связано с повышенными физико-механическими свойствами стали с ультрамелкозернистой кристаллической структурой.

**Ключевые слова:** резание материалов; крупнозернистая (КЗ) и ультрамелкозернистая (УМЗ) структура; низколегированная сталь; температура резания; концевое фрезерование.

**Благодарности:** Авторы благодарят директора НИИ ФПМ при Уфимском университете науки и технологий (г. Уфа) профессора Р.З. Валиева за любезное предоставление материалов для исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-69-47059, <https://rscf.ru/project/20-69-47059/>).

**Для цитирования:** Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А., Клевцов Г.В. Исследование температуры концевого фрезерования низколегированной стали в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 1. С. 61–69. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-1-67-6.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения является исследование свойств объемных наноструктурированных металлических материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой [1; 2]. Однако, несмотря на нарастающий интерес к таким материалам со стороны исследователей и инженеров, данных об обрабатываемости резанием материалов с УМЗ структурой недостаточно. Имеются данные о зависимости шероховатости поверхности от типа кристаллической структуры обрабатываемого материала при фрезеровании алюминиевого сплава В95 [3]. Из результатов исследования [3] следует, что при обработке сплава с УМЗ структурой качество поверхности получается выше по сравнению со сплавом с крупнозернистой (КЗ) структурой. Аналогичные исследования про-

ведены для точения нержавеющей стали 12X18H10T [4]. В работе также отмечается существенное снижение параметров шероховатости при обработке материала с УМЗ структурой. Из работы [5] следует, что микротвердость и микроструктура приповерхностного слоя заготовки после фрезерования отличаются для стали с крупным и мелким зерном. В работе [6], посвященной исследованию концевого фрезерования микроканалов в заготовке из УМЗ низкоуглеродистой стали, также отмечается снижение параметров шероховатости поверхности при обработке УМЗ материала.

В работе [7] предложен удобный и эффективный метод определения констант модели Джонсона – Кука для УМЗ титана. Полученные значения констант в дальнейшем использовались авторами для расчета сил резания при обработке УМЗ титана [8]. В работе [9] описан быстрый и точный алгоритм расчета температуры

при резании УМЗ титана, а также отмечено, что температура резания титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой существенно ниже, чем температура резания сплава с КЗ структурой. Авторы работы [10] отмечают увеличение силы резания при обработке УМЗ титанового сплава ВТ6, а также снижение размеров заусенцев по сравнению с КЗ титаном. В работе [11] на основании исследования параметров стружки и теплопроводности КЗ и УМЗ титана сделан вывод о потенциально возможном повышении обрабатываемости резанием и снижении износа режущего инструмента при переходе к структуре с мелким зерном.

В то же время отсутствуют данные о влиянии структуры стали и режимов обработки на температуру резания. Температура резания является важным фактором, который необходимо учитывать технологу при проектировании операций механической обработки материалов [12]. Температура резания оказывает влияние на стойкость режущего инструмента, шероховатость обработанной поверхности, размерную точность обработки и многие другие параметры процесса резания [13; 14]. Кроме того, температура резания может использоваться как один из основных диагностических сигналов наряду с силой резания [15; 16]. Отдельно стоит отметить использование температуры резания в качестве сигнала обратной связи при разработке систем автоматического управления процессом обработки [17; 18].

Цель работы – исследование влияния крупнозернистой и ультрамелкозернистой кристаллической структуры стали 09Г2С и режимов ее обработки на температуру резания при концевого фрезерования.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследуемого материала была выбрана малоуглеродистая низколегированная сталь 09Г2С, ГОСТ 19281-2014 (таблица 1).

Исследовали два образца размерами 40×15×10 мм каждый в одном из двух состояний: состоянии поставки

с КЗ структурой и после равноканального углового прессования (РКУП) по схеме «Конформ» (РКУП-К) с УМЗ структурой. Технология РКУП-К включала в себя: гомогенизирующий отжиг стали при 820 °С с последующей закалкой в воде + отпуск при 350 °С + холодное РКУП-К, 4 прохода по маршруту Вс + дополнительный отжиг при 350 °С с выдержкой 10 мин. Более подробно технология получения и свойства УМЗ стали представлены в [19; 20]. Механические свойства стали 09Г2С до и после РКУП-К приведены в таблице 2.

Эксперимент проводился на универсальном фрезерном станке PROMA FHV-50PD. Обработку заготовок осуществляли твердосплавной фрезой 12-12D-30C-75L-4F HRC55. В ходе обработки охлаждение не использовалось. Температура резания регистрировалась с помощью тепловизора Seek Thermal Compact XR. Характеристики тепловизора: температурный диапазон от -40 °С до +330 °С, угол обзора 20°, разрешение 412×312 пикселей, частота обновления кадров 9 Гц.

При создании модели с использованием ограниченного количества данных использован бутстреп (bootstrap) анализ. За счет создания множества случайных выборок с возвратом из исходной выборки создается тестовая статистика с нахождением доверительных интервалов. Бутстреп-анализ проводился для доверительного интервала 0,95 с количеством выборок 999, тип доверительных интервалов Вса (уточненный процентиль), метод выборки – выборка объектов. Все расчеты проводились в среде программирования R.

Для поиска наилучшей структуры математической модели температуры резания применялся метод автоматического перебора моделей с отбрасыванием незначимых параметров. Выбор регрессионной модели осуществлялся по методике ступенчатого перебора вперед/назад с оценкой эффективности модели по критерию АИС и отбрасыванием незначимых параметров. Информационный критерий Акаике (обычно называемый АИС) – это критерий выбора между статистическими

Таблица 1. Химический состав стали 09Г2С (мас. %)   
 Table 1. Chemical composition of the 09G2S steel (wt. %)

Сталь	Содержание элемента, мас. %									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Cu	Fe
09Г2С	0,09	0,64	1,26	0,007	<0,003	0,1	0,08	0,02	0,14	Остальное

Таблица 2. Средний размер зерна ( $d_{cp}$ ) и механические свойства стали 09Г2С в различных состояниях   
 Table 2. Average grain size ( $d_{cp}$ ) and mechanical properties of the 09G2S steel in different states

Состояние стали	Физико-механические свойства стали				
	$d_{cp}$ , мкм	НВ	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Исходное (КЗ состояние)	20,00	143	485±3	354±11	25±1,8
После РКУП-К (УМЗ состояние)	0,45	331	838±12	655±44	10±1,5

моделями. Информационный критерий учитывает соответствие модели данным с учетом количества параметров модели. При оценке предпочтение отдается модели с минимальным значением критерия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты измерения температуры резания для стали 09Г2С с КЗ и УМЗ структурой приведены в таблицах 3, 4. Видно, что температура резания зависит как от режимов, так и от типа кристаллической структуры сплава.

На рис. 1 приведены графики распределения (box plot) температуры резания для стали 09Г2С в КЗ и УМЗ состояниях. На графиках можно видеть крайние значения (размах), выбросы, границы квартилей, медиану. График для стали в КЗ состоянии показывает распределение температуры резания с возможными выбросами для опытов № 3 и 5 (рис. 1 а). В случае стали в УМЗ состоянии выбросов не обнаружено (рис. 1 б). Из рис. 1 видно, что интерквартильный размах (высота прямоугольника) для УМЗ стали в 2 раза больше, а медиана существенно выше. Таким образом, температуры при обработке стали 09Г2С в УМЗ состоянии в целом выше, чем при обработке стали 09Г2С в КЗ состоянии.

На рис. 2, 3 приведены графики бутстреп-анализа. Бутстреп-анализ отображает оценку значимости параметров режимов обработки при вычислении температуры резания. Так, для стали в КЗ состоянии скорость вращения фрезы  $n$  и подача  $s$  незначимы, что видно из рис. 2 б, 2 с (абсцисса пикового значения графика находится возле нуля для  $n$  и  $s$ ). Поэтому для стали в КЗ состоянии значимым параметром модели является только глубина резания  $t$ . Для модели температуры резания стали в УМЗ состоянии значимы подача  $s$  (рис. 3 с), а также глубина резания в первой и второй степени (рис. 3 б, 3 д).

Модель зависимости температуры резания от режимов обработки для стали 09Г2С в КЗ состоянии представлена формулой

$$T = k + c \cdot t + d \cdot t^2,$$

где  $T$  – температура, °С;

$t$  – глубина резания, мм;

$k, c, d$  – настраиваемые параметры модели.

На рис. 4 приведена диаграмма параметров модели с остатками для КЗ стали. Графики отображают сходимость модели по всем параметрам. Это видно из близости значений с остатками (сплошная линия) и модельных значений (пунктирная линия).

Модель зависимости температуры резания от режимов обработки для стали 09Г2С в УМЗ состоянии представлена формулой

$$T = t + s + I \cdot t^2,$$

где  $I$  – параметр модели.

На рис. 5 приведена диаграмма параметров модели с остатками для УМЗ стали. Наблюдается высокая сходимость модели.

В ходе исследования влияния режимов обработки на температуру при концевого фрезеровании заготовок из стали 09Г2С в КЗ и УМЗ состояниях получены следующие

результаты: для стали в КЗ состоянии наибольшее влияние на температуру резания имеет глубина резания  $t$ , для стали в УМЗ состоянии – глубина резания  $t$  и подача  $s$ . В обоих случаях зависимость температуры от глубины резания описывается полиномом второй степени.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ экспериментальных данных показал различный характер зависимости температуры резания от режимов обработки для стали в КЗ и УМЗ состояниях. Вероятно, более высокую температуру при обработке стали в УМЗ состоянии можно объяснить повышенным уровнем физико-механических свойств данной стали. Этот результат противоположен полученному в работе [7] для температуры резания титана.

По-видимому, для полного ответа на вопрос о влиянии типа кристаллической структуры сплава на температуру резания необходимо учитывать комплекс физико-механических свойств материала. Так, для исследованной в данной работе стали 09Г2С характерен существенный рост механических свойств при измельчении зерна. Это наиболее заметно по росту прочности стали 09Г2С, которая при РКУП увеличивается в 1,7 раза (с 485 до 838 МПа), а также росту предела текучести стали в 1,85 раза (с 354 до 655 МПа). В то же время теплопроводность стали выше, чем титана. Следовательно, можно ожидать различный характер распределения температуры при резании стали и титана. Для процесса концевого фрезерования стали 09Г2С в КЗ и УМЗ состояниях характерно отсутствие влияния скорости резания на температуру в исследуемом диапазоне режимов обработки. Таким образом, при обработке фрезерованием данной группы материалов преобладающее влияние на температурный режим оказывает силовая составляющая, которая в первую очередь определяется глубиной резания. Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование температуры фрезерования стали с различными типами кристаллической структуры в более широком диапазоне скоростей резания. При этом для проведения экспериментов может понадобиться не только более скоростное станочное оборудование, но и тепловизор с более широким диапазоном измерения температуры, так как температура резания растет с ростом скорости резания.

Проведение исследований осложняется также тем, что в настоящее время заготовки из сплавов с УМЗ структурой для проведения экспериментов по обработке резанием изготавливают в штучных количествах. Нехватка обрабатываемого материала сильно ограничивает спектр проводимых исследований. Поэтому можно ожидать, что в ближайшее время по-прежнему будет наблюдаться недостаток экспериментальных данных об обработке резанием сплавов с УМЗ структурой. Частично найти выход из ситуации помогает математическое моделирование результатов экспериментов при малом числе опытов. Статистические методы, аналогичные применявшемуся в данной работе бутстреп-анализу, позволяют выявить значимость факторов и сформулировать аналитические зависимости для параметров обработки исходя из сравнительно небольшой выборки опытных данных. Таким образом, предложенный в настоящем исследовании подход поможет в дальнейшем продолжать исследо-

вания обработки резанием сплавов с различными типами кристаллической структуры. Данные исследования будут

**Таблица 3.** Температура фрезерования стали 09Г2С в исходном состоянии  
**Table 3.** Milling temperature of the 09G2S steel in the initial state

№ опыта	Частота вращения шпинделя <i>n</i> , об/мин	Подача <i>s</i> , мм/мин	Глубина резания <i>t</i> , мм	Температура резания, <i>T</i> , °С
1	720	65	0,6	91,3
2	875	65	0,8	84,5
3	720	65	1,0	198,0
4	720	100	0,6	94,0
5	875	100	1,0	259,0*
6	720	470	0,6	90,0
7	720	470	1,0	130,3
8	875	470	0,8	126,3
9	875	185	0,6	115,5
10	720	65	0,8	110,3

*Примечание.* \*Возможно большее значение температуры, поскольку полученное значение близко к верхней границе диапазона измерения прибора (300 °С).

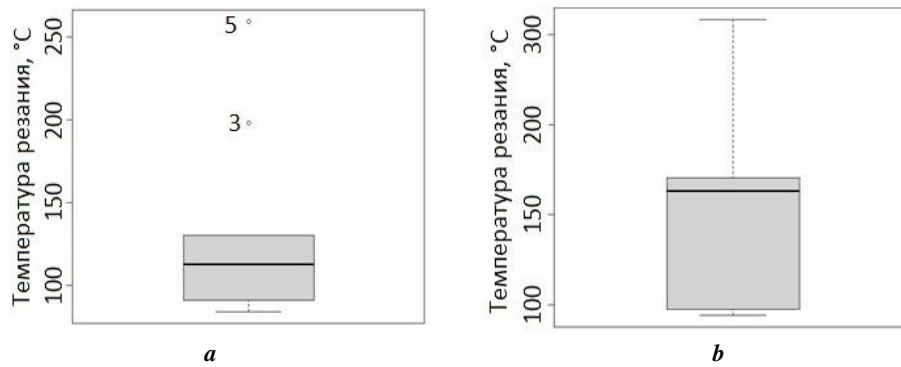
*Note.* \*A higher temperature value is possible, since the obtained value is close to the upper limit of the instrument measurement range (300 °C).

**Таблица 4.** Температура фрезерования стали 09Г2С после РКУП-К  
**Table 4.** Milling temperature of the 09G2S steel after ECAP-C

№ опыта	Частота вращения шпинделя <i>n</i> , об/мин	Подача <i>s</i> , мм/мин	Глубина резания <i>t</i> , мм	Температура резания, <i>T</i> , °С
1	720	65	0,6	95,5
2	875	65	0,8	97,3
3	720	65	1,0	163,0
4	720	100	0,6	94,3
5	875	100	0,8	109,5
6	875	100	1,0	195,3
7	720	185	0,6	168,8
8	875	185	0,8	170,3
9	875	185	1,0	258,3*

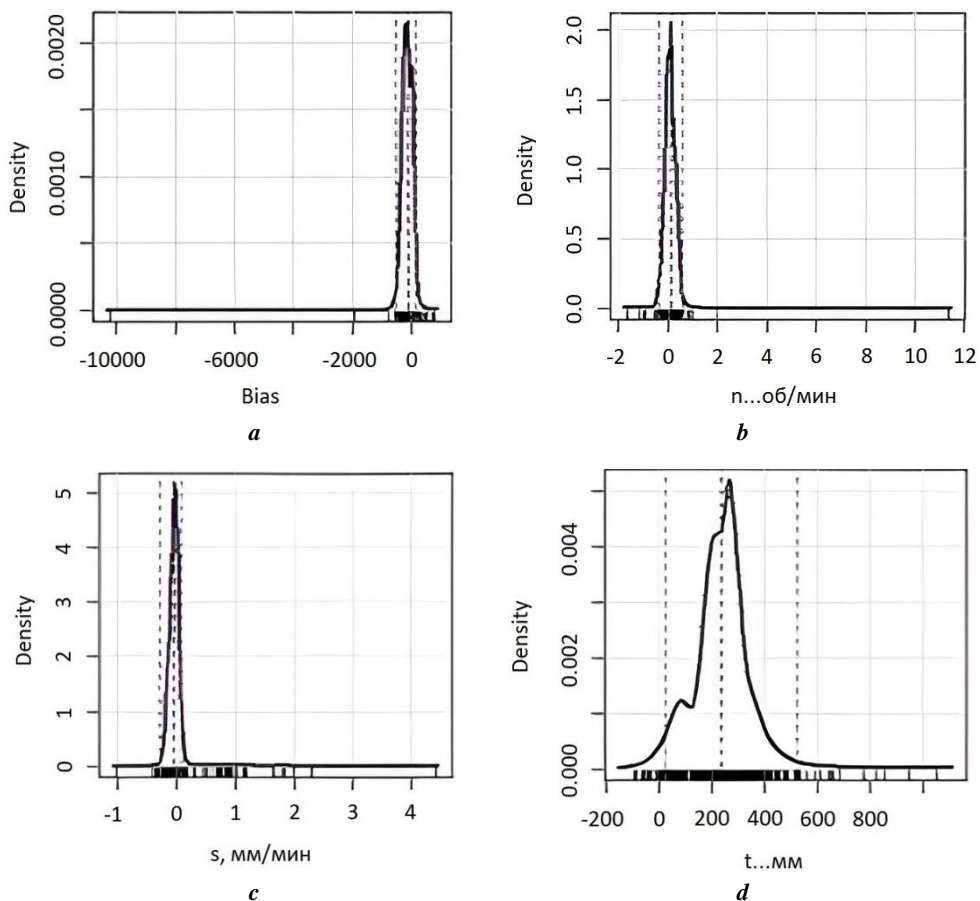
*Примечание.* \*Возможно большее значение температуры, поскольку полученное значение близко к верхней границе диапазона измерения прибора (300 °С).

*Note.* \*A higher temperature value is possible, since the obtained value is close to the upper limit of the instrument measurement range (300 °C).

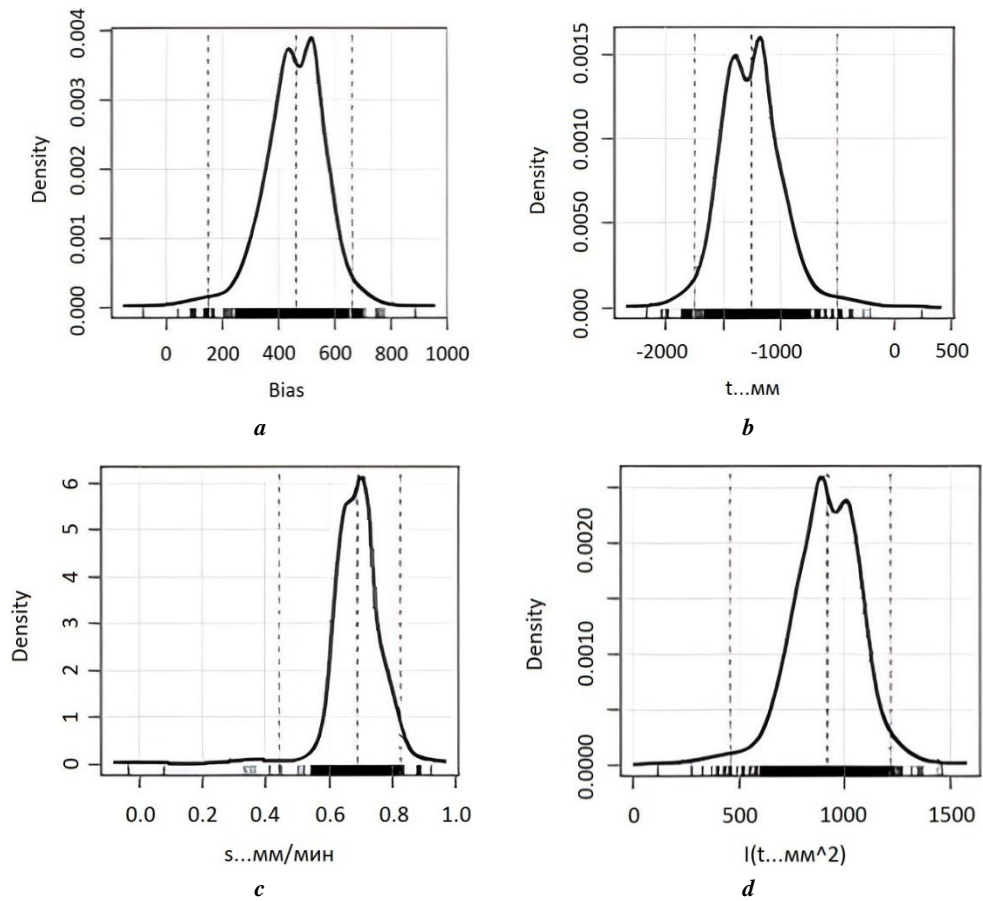


**Рис. 1.** Графики распределения температуры резания для стали 09Г2С в КЗ и УМЗ состояниях. Прямоугольник отображает границы нижнего и верхнего квартилей, чертой обозначена медиана: **a** – для КЗ состояния; **b** – для УМЗ состояния

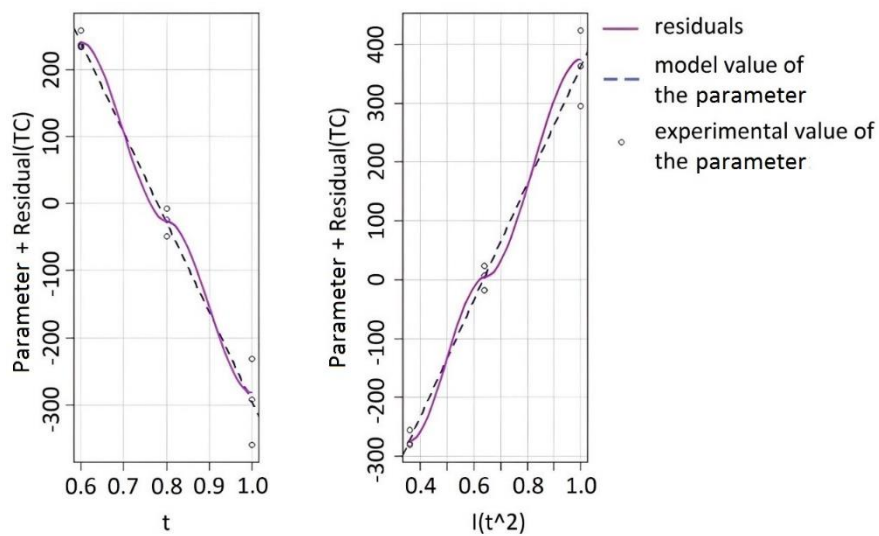
**Fig. 1.** Box plots for cutting temperature of the 09G2S steel in CG and UFG states. The rectangle shows the boundaries of the lower and upper quartiles, the median is indicated by a dash: **a** – for CG state; **b** – for UFG state



**Рис. 2.** Графики бутстреп-анализа для КЗ стали: **a** – смещение; **b** –  $n$ , об/мин; **c** –  $s$ , мм/мин; **d** –  $t$ , мм  
**Fig. 2.** Bootstrap-analysis graphs for CG steel: **a** – bias; **b** –  $n$ , rev/min; **c** –  $s$ , mm/min; **d** –  $t$ , mm



**Рис. 3.** Графики бутстреп-анализа для УМЗ стали:  
**a** – смещение; **b** –  $t$ , мм; **c** –  $s$ , мм/мин; **d** –  $I(t, \text{мм}^2)$   
**Fig. 3.** Bootstrap-analysis graphs for UFG steel:  
**a** – bias; **b** –  $t$ , mm; **c** –  $s$ , mm/min; **d** –  $I(t, \text{mm}^2)$



**Рис. 4.** Диаграмма параметров модели с остатками для КЗ стали  
**Fig. 4.** Diagram of the model parameters with residuals for CG steel

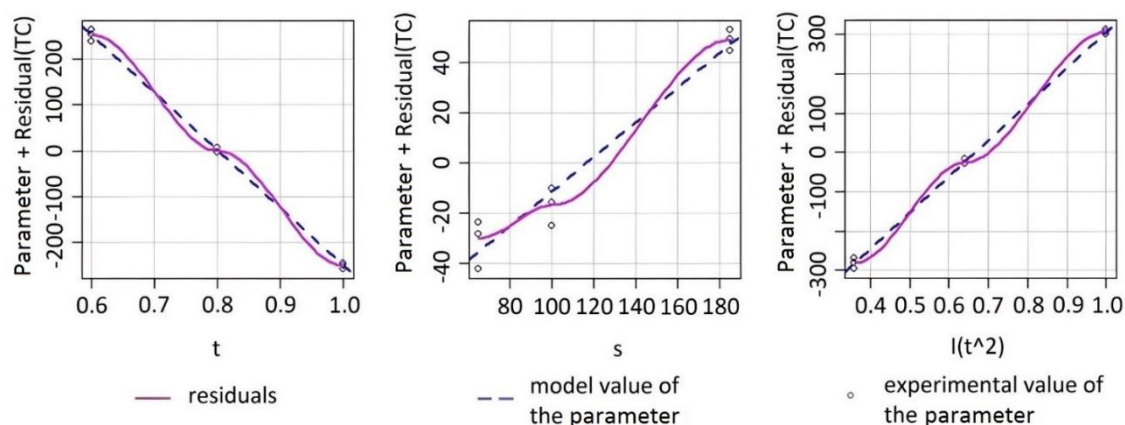


Рис. 5. Диаграмма параметров модели с остатками для УМЗ стали  
 Fig. 5. Diagram of the model parameters with residuals for UFG steel

необходимы для проектирования технологических процессов изготовления деталей из сплавов с ультрамелкозернистой кристаллической структурой.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным фактором, влияющим на температуру концевого фрезерования стали 09Г2С в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях, является глубина резания. Для стали в ультрамелкозернистом состоянии значимым фактором для вычисления температуры резания, помимо глубины резания, является подача, а уровень ее температуры резания в целом выше, чем у стали в крупнозернистом состоянии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Elias C.N., Meyers M.A., Valiev R.Z., Monteiro S.N. Ultra fine grained titanium for biomedical applications: an overview of performance // *Journal of Materials Research and Technology*. 2013. Vol. 2. № 4. P. 340–350. DOI: [10.1016/j.jmrt.2013.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.07.003).
- Lowe T.C., Valiev R.Z., Xiaochun Li, Ewing B.R. Commercialization of bulk nanostructured metals and alloys // *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 265–272. DOI: [10.1557/s43577-021-00060-0](https://doi.org/10.1557/s43577-021-00060-0).
- Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Подгорных О.А., Шамарин Н.Н., Воронцов А.В. Влияние равноканального углового прессования на качество поверхности алюминиевого сплава В95 после фрезерования // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2018. Т. 20. № 4. С. 96–106. DOI: [10.17212/1994-6309-2018-20.4-96-106](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2018-20.4-96-106).
- Шамарин Н.Н., Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Подгорных О.А., Утяганова В.Р. Влияние структурного состояния коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т на качество поверхности после точения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 1. С. 102–113. DOI: [10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113).
- Rodrigues A.R., Balancin O., Gallego J., de Assis C.L.F., Matsumoto H., de Oliveira F.B., da Silva Moreira S.R., da Silva Neto O.V. Surface Integrity Analysis when Milling Ultrafine-grained Steels // *Materials Research*. 2012. Vol. 15. № 1. P. 125–130. DOI: [10.1590/S1516-14392011005000094](https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000094).
- de Assis C.L.F., Jasinevicius R.G., Rodrigues A.R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. P. 1155–1165. DOI: [10.1007/s00170-014-6503-2](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6503-2).
- Ning Jinqiang, Nguyen Vinh, Huang Yong, Hartwig K.T., Liang S.Y. Inverse determination of Johnson–Cook model constants of ultra-fine-grained titanium based on chip formation model and iterative gradient search // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 99. P. 1131–1140. DOI: [10.1007/s00170-018-2508-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2508-6).
- Ning Jinqiang, Nguyen Vinh, Liang S.Y. Analytical modeling of machining forces of ultra-fine-grained titanium // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 627–636. DOI: [10.1007/s00170-018-2889-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2889-6).
- Ning Jinqiang, Nguyen Vinh, Huang Yong, Hartwig K.T., Liang S.Y. Constitutive modeling of ultra-fine-grained titanium flow stress for machining temperature prediction // *Bio-design and Manufacturing*. 2019. Vol. 2. P. 153–160. DOI: [10.1007/s42242-019-00044-9](https://doi.org/10.1007/s42242-019-00044-9).
- Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А., Клевцов Г.В., Боков И.А., Дёма Р.Р., Амиров Р.Н., Латыпов О.Р. Исследование силы резания при торцовом фрезеровании крупнозернистого и ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 // *Технология металлов*. 2021. № 7. С. 21–28. EDN: [DBJMWH](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2021-7.С.21-28).
- Lapovok R., Molotnikov A., Levin Y., Bandaranayake A., Estrin Y. Machining of coarse grained and ultra fine grained titanium // *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47. P. 4589–4594. DOI: [10.1007/s10853-012-6320-7](https://doi.org/10.1007/s10853-012-6320-7).
- Storchak M., Kushner V., Möhling H.-C., Stehle T. Refinement of temperature determination in cutting zones //

- Journal of Mechanical Science and Technology. 2021. Vol. 35. P. 3659–3673. DOI: [10.1007/s12206-021-0736-4](https://doi.org/10.1007/s12206-021-0736-4).
13. Cheng Hu, Zhuang Kejia, Weng Jian, Zhang Xiaoming, Ding Han. Cutting temperature prediction in negative-rake-angle machining with chamfered insert based on a modified slip-line field model // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 167. Article number 105273. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105273](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105273).
  14. Aliev M.M., Fomenko A.V., Fominov E.V., Shuchev K.G., Mironenko A.E. Influence of Wear-Resistant Coatings on Processes in the Contact Zone during Metal Cutting // *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43. P. 1101–1105. DOI: [10.3103/S1068798X23090034](https://doi.org/10.3103/S1068798X23090034).
  15. Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А. Разработка цифрового двойника процесса точения на основе машинного обучения // *Frontier Materials & Technologies*. 2021. № 1. С. 32–41. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-32-41](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-32-41).
  16. Григорьев С.Н. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
  17. Reka N.G., Kourov G.N., Lyutov A.G. Temperature Control Channel in the Metal-Cutting Zone of a Lathe // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. № 2. P. 163–167. DOI: [10.3103/S1068798X16020192](https://doi.org/10.3103/S1068798X16020192).
  18. Kuznetsov A.P. Temperature Control of Metal-Cutting Machines // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35. P. 46–50. DOI: [10.3103/S1068798X15010165](https://doi.org/10.3103/S1068798X15010165).
  19. Merson E.D., Myagkikh P.N., Klevtsov G.V., Merson D.L., Vinogradov A. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel // *Engineering Fracture Mechanics*. 2019. Vol. 210. P. 342–357. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2018.05.026](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.026).
  20. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 440 p. DOI: [10.1002/9781118742679](https://doi.org/10.1002/9781118742679).
- REFERENCES**
1. Elias C.N., Meyers M.A., Valiev R.Z., Monteiro S.N. Ultra fine grained titanium for biomedical applications: an overview of performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 340–350. DOI: [10.1016/j.jmrt.2013.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.07.003).
  2. Lowe T.C., Valiev R.Z., Xiaochun Li, Ewing B.R. Commercialization of bulk nanostructured metals and alloys. *MRS Bulletin*, 2021, vol. 46, pp. 265–272. DOI: [10.1557/s43577-021-00060-0](https://doi.org/10.1557/s43577-021-00060-0).
  3. Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A., Shamarin N.N., Vorontsov A.V. The Effect of Equal-Channel Angular Pressing on the Surface Quality of Aluminum Alloy 7075 after Milling. *Obrabotka metallov (Metal Working and Material Science)*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 96–106. DOI: [10.17212/1994-6309-2018-20.4-96-106](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2018-20.4-96-106).
  4. Shamarin N.N., Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Podgornykh O.A., Utyaganova V.R. The Effect of the Structural State of AISI 321 Stainless Steel on Surface Quality During Turning. *Obrabotka metallov (Metal Working and Material Science)*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 102–113. DOI: [10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.1-102-113).
  5. Rodrigues A.R., Balancin O., Gallego J., de Assis C.L.F., Matsumoto H., de Oliveira F.B., da Silva Moreira S.R., da Silva Neto O.V. Surface Integrity Analysis when Milling Ultrafine-grained Steels. *Materials Research*, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 125–130. DOI: [10.1590/S1516-14392011005000094](https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000094).
  6. de Assis C.L.F., Jasinevicius R.G., Rodrigues A.R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, pp. 1155–1165. DOI: [10.1007/s00170-014-6503-2](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6503-2).
  7. Ning Jinqiang, Nguyen Vinh, Huang Yong, Hartwig K.T., Liang S.Y. Inverse determination of Johnson–Cook model constants of ultra-fine-grained titanium based on chip formation model and iterative gradient search. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, pp. 1131–1140. DOI: [10.1007/s00170-018-2508-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2508-6).
  8. Ning Jinqiang, Nguyen Vinh, Liang S.Y. Analytical modeling of machining forces of ultra-fine-grained titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, pp. 627–636. DOI: [10.1007/s00170-018-2889-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2889-6).
  9. Ning Jinqiang, Nguyen Vinh, Huang Yong, Hartwig K.T., Liang S.Y. Constitutive modeling of ultra-fine-grained titanium flow stress for machining temperature prediction. *Bio-design and Manufacturing*, 2019, vol. 2, pp. 153–160. DOI: [10.1007/s42242-019-00044-9](https://doi.org/10.1007/s42242-019-00044-9).
  10. Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A., Klevtsov G.V., Bokov I.A., Dema R.R., Amirov R.N., Latypov O.R. Investigation of cutting force during face milling of coarse-grained and ultrafine-grained titanium alloys VT-6. *Russian metallurgy (Metally)*, 2022, vol. 2022, no. 13, pp. 1857–1863. DOI: [10.1134/s0036029522130316](https://doi.org/10.1134/s0036029522130316).
  11. Lapovok R., Molotnikov A., Levin Y., Bandaranayake A., Estrin Y. Machining of coarse grained and ultra fine grained titanium. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, pp. 4589–4594. DOI: [10.1007/s10853-012-6320-7](https://doi.org/10.1007/s10853-012-6320-7).
  12. Storchak M., Kushner V., Möhling H.-C., Stehle T. Refinement of temperature determination in cutting zones. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, vol. 35, pp. 3659–3673. DOI: [10.1007/s12206-021-0736-4](https://doi.org/10.1007/s12206-021-0736-4).
  13. Cheng Hu, Zhuang Kejia, Weng Jian, Zhang Xiaoming, Ding Han. Cutting temperature prediction in negative-rake-angle machining with chamfered insert based on a modified slip-line field model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 167, article number 105273. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105273](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105273).
  14. Aliev M.M., Fomenko A.V., Fominov E.V., Shuchev K.G., Mironenko A.E. Influence of Wear-Resistant Coatings on Processes in the Contact Zone during Metal Cutting. *Russian Engineering Research*, 2023, vol. 43, pp. 1101–1105. DOI: [10.3103/S1068798X23090034](https://doi.org/10.3103/S1068798X23090034).
  15. Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A. Development of turning process digital twin based on machine learning. *Frontier Materials & Technologies*, 2021, no. 1, pp. 32–41. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-32-41](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-32-41).
  16. Grigorev S.N. *Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva* [Diagnostics of automated production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 600 p.



17. Reka N.G., Kourov G.N., Lyutov A.G. Temperature Control Channel in the Metal-Cutting Zone of a Lathe. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 163–167. DOI: [10.3103/S1068798X16020192](https://doi.org/10.3103/S1068798X16020192).
18. Kuznetsov A.P. Temperature Control of Metal-Cutting Machines. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, pp. 46–50. DOI: [10.3103/S1068798X15010165](https://doi.org/10.3103/S1068798X15010165).
19. Merson E.D., Myagkikh P.N., Klevtsov G.V., Merson D.L., Vinogradov A. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, vol. 210, pp. 342–357. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2018.05.026](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.026).
20. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. *Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications*. Hoboken, John Wiley & Sons Publ., 2014. 440 p. DOI: [10.1002/9781118742679](https://doi.org/10.1002/9781118742679).

## The study of end milling temperature of low-alloy steel in coarse-grained and ultrafine-grained states

© 2024

*Dmitry A. Rastorguev*<sup>1</sup>, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”

*Aleksandr A. Sevastyanov*<sup>\*2</sup>, postgraduate student

of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”

*Gennady V. Klevtsov*, Doctor of Sciences (Engineering),

professor of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

\*E-mail: [alex-119977@yandex.ru](mailto:alex-119977@yandex.ru),  
[a.sevastyanov@tftsru.ru](mailto:a.sevastyanov@tftsru.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7465-650X>

Received 05.07.2023

Accepted 29.01.2024

**Abstract:** The paper presents the results of the study of the end milling temperature of low-alloy steel depending on the cutting modes and the type of crystalline structure. The experiment was carried out on a PROMA FHV-50PD universal milling machine. The blanks were processed using a 12-12D-30C-75L-4F HRC55 carbide milling cutter. No cooling was used during processing. The obtained data were statistically analyzed to identify the dependence of the end milling temperature of low-alloy steel on the processing modes and the steel crystalline structure. When creating a mathematical model of cutting temperature, the authors carried out a bootstrap analysis to identify the significance of the parameters of the processing modes. The mathematical model was chosen using the Akaike informative criterion. It was found that mathematical models of the temperature dependence on processing modes for both types of crystalline structure include the cutting depth in the second power. At the same time, for steel in an ultrafine-grained state, both the cutting depth and the feed are statistically significant. It was not possible to detect the influence of cutting speed on temperature in the studied range of processing modes. Thus, when milling this group of materials, the force component primarily determined by the cutting depth exerts the predominant influence on the temperature regime. The level of cutting temperature when processing steel in an ultrafine-grained state is generally higher than when processing steel in a coarse-grained state, which should be associated with the increased physical and mechanical properties of steel with an ultrafine-grained crystalline structure.

**Keywords:** material cutting; coarse-grained (CG) and ultrafine-grained (UFG) structure; low-alloy steel; cutting temperature; end milling.

**Acknowledgments:** The authors thank Professor R.Z. Valiev, the Director of the Research Institute of Physics of Advanced Materials at Ufa University of Science and Technology (Ufa), for kindly provided materials for the study.

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-69-47059, <https://rscf.ru/project/20-69-47059/>).

**For citation:** Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A., Klevtsov G.V. The study of end milling temperature of low-alloy steel in coarse-grained and ultrafine-grained states. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 1, pp. 61–69. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-1-67-6.