

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9+539.621

doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-4-11

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОКАРНОГО РЕЗЦА С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ВТОРИЧНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Евгений Валерьевич Фоминов^{1✉}, Андрей Анатольевич Марченко², Виктория Викторовна Сухомлинова³, Оксана Александровна Пятницкая⁴, Дмитрий Игоревич Гладких⁵

^{1,2,3,4,5}Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ fominoff83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

² tobago13@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4028-6712>

³ sigen-67@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-4756>

⁴ f972@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4195-2190>

⁵ ya.gladckih-dmitriy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2292-256X>

Аннотация

Цель исследования: моделирование температурного распределения вдоль передней поверхности токарного резца для заданного момента эволюции системы резания.

Задача, решению которой посвящена статья. Оценка влияния геометрических параметров зоны вторичных пластических деформаций на характеристики температурного распределения для передней поверхности токарного резца.

Методы исследования. Определение геометрических параметров пластически деформированного слоя проводилось путём цифрового моделирования контактных процессов методом конечных элементов. Часть исходных данных для компьютерного моделирования и последующая верификация его результатов осуществлялась на основании натурального эксперимента при продольном точении заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т твердосплавной пластиной Т15К6.

Новизна работы. Прогнозирование температуры на передней поверхности резца для заданного момента эволюции системы резания на основании научного подхода, связанного с применением гидродинамических аналогий к оценке деформационных процессов в обрабатываемом материале и комбинированными данными натурального и цифрового эксперимента.

Результаты исследования. Посредством цифрового эксперимента определены границы зоны вторичных пластических деформаций в стружке, затем произведено построение кривой температурного распределения на передней поверхности резца в двух вариантах: для переменной и для постоянной средней толщины деформированного слоя. Установлено, что среднее значение температуры контакта в обоих случаях отличается незначительно и хорошо согласуется с результатами натурального эксперимента. Разница же между максимальными значениями температуры существенна: при переменной толщине слоя расчётная температура на 11% ниже, чем для варианта с постоянным значением данного параметра.

Выводы: для расчёта средней температуры на участке вторичных пластических деформаций может быть использовано среднее значение толщины деформированного слоя. В случае решения задач, связанных с определением максимальной температуры в зоне резания, целесообразно учитывать изменение толщины пластически деформированного слоя в стружке вдоль передней поверхности резца.

Ключевые слова: температура, резание, сталь, точение, деформации.

Финансирование: работа выполнена в инициативном порядке.

Ссылка для цитирования:

Фоминов Е.В. Моделирование температурного распределения на передней поверхности токарного резца с учётом геометрических параметров зоны вторичных пластических деформаций / Е. В. Фоминов, А. А. Марченко, В. В. Сухомлинова, О. А. Пятницкая, Д. И. Гладких // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 02. – С. 4 – 11. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-4-11.

MODELING OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE LATHE FRONT SURFACE TAKING INTO ACCOUNT GEOMETRIC PARAMETERS OF THE SECONDARY PLASTIC ZONE

Evgeny Valeryevich Fominov^{1✉}, Andrey Anatolyevich Marchenko², Victoria Viktorovna Sukhomlinova³, Oksana Aleksandrovna Pyatnitskaya⁴, Dmitry Igorevich Gladkikh⁵

^{1,2,3,4,5} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ fominoff83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0165-7536>

² tobago13@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4028-6712>

³ sigen-67@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-4756>

⁴ f972@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4195-2190>

⁵ ya.gladckih-dmitriy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2292-256X>

Abstract

The study objective: modeling of the temperature distribution along the front surface of the lathe cutter for a given moment of the cutting system evolution.

The problem to which the paper is devoted. To evaluate the influence of the geometric parameters of the secondary plastic zone of on the characteristics of the temperature distribution for the front surface of the lathe cutter.

Research methods. Geometric parameters of the plastically deformed layer are defined by digital modeling of contact processes by the finite element method. Some initial data for computer modeling and subsequent verification of its results are carried out on the basis of a full-scale experiment with longitudinal turning of a work piece made of stainless steel 12X18H9T with a T15K6 solid-alloy plate.

The novelty of the work. Prediction of the temperature on the cutter front surface for a given moment of the cutting system evolution based on a scientific approach of using hydrodynamic analogies to the evaluation of deformation processes in the machined material and combined data of a full-scale and digital experiment.

Funding: the work is carried out on an initiative basis.

Reference for citing:

Fominov EV, Marchenko AA, Sukhomlinova VV, Pyatnitskaya OA, Gladkikh DI. Modeling of the temperature distribution on the lathe front surface taking into account geometric parameters of the secondary plastic zone. *Transport Engineering*. 2023; 2:4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-4-11.

Введение

Процесс резания металлов сопровождается значительным тепловыделением в зоне обработки. Высокие значения температуры способствуют проявлению ряда неблагоприятных для системы резания факторов, среди которых можно особо выделить интенсификацию процессов изнашивания режущего инструмента (РИ). Прогнозирование температуры для выбранного момента функционирования си-

стемы резания является важной задачей, поскольку позволяет оценить вероятность наступления критического износа инструмента, предотвратить возможное ухудшение качества обрабатываемой поверхности, а также рационально выбрать или при необходимости скорректировать первоначально выбранные режимы резания. Разработке цифровых двойников процесса изготовления деталей, позволяющих опреде-

леть температуру в зоне резания, можно использовать данные о температуре в зоне резания, полученные в результате экспериментальных исследований. В работе рассмотрены вопросы моделирования температурного поля в зоне резания с учетом геометрических параметров вторичной пластической зоны. Для оценки влияния геометрических параметров вторичной пластической зоны на характеристики температурного поля в зоне резания проведено моделирование процесса резания с помощью метода конечных элементов. Исходные данные для моделирования и последующей проверки его результатов получены на основе эксперимента с продольным токарным обработкой заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т твердосплавной пластиной Т15К6.

Keywords: temperature, cutting, steel, turning, deformation.

лить необходимые параметры процесса резания с учётом эволюционной динамики системы, посвящено множество работ с применением различных современных методов моделирования [1-4], причём наибольшая точность достигается в тех случаях, когда в качестве входных параметров частично используются данные, полученные в результате натурального эксперимента. Одним из прогнозируемых параметров при моделировании процессов физико-механической обработки металлов выступает температура в зоне резания [5-8].

Нагрев передней поверхности токарного резца в местах контакта с обрабатываемым материалом происходит за счёт тепловыделения на трёх последовательно расположенных участках: первичных пластических деформаций (ППД), вторичных пластических деформаций (ВПД) и участке упругого контакта (УК). Применение гидродинамических аналогий к оценке деформационных процессов в обрабатываемом материале позволило получить аналитические зависимости, описывающие температурное поле вдоль участка ВПД на рабочей поверхности РИ для различных диапазонов скоростей резания [9, 10]. В этом случае поверхностный микрообъём в стружке рассматривается как зона квазивязкого течения материала, выделение теплоты в которой происходит за счёт вязкой диссипации энергии трения. Повышение температуры в зоне резания с течением времени согласно зависимостям [9, 10] происходит за счёт увеличения длины контакта обрабатываемого материала (стружки) с рабочими поверхностями РИ на участке ВПД в результате их износа. Такой

Материалы, модели, эксперименты и методы

Расчёт температуры и экспериментальные исследования проводились для процесса продольного точения заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н9Т диаметром $D = 200$ мм без применения охлаждения, инструментальный материал-твёрдый сплав Т15К6. Скорость резания $v = 2,5$ м/с, подача $s = 0,39$ мм/об, глубина резания $t = 0,5$ мм, передний угол $\gamma = 10^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$. Длина контакта l_k по передней поверхности оценивались путём оптической

подход позволяет определять температуру в зоне обработки для заданной точки эволюции системы резания на основе экспериментальных данных об изнашивании рабочих поверхностей РИ.

Для расчёта средней температуры и построения температурного распределения на передней поверхности РИ по математической модели [9] необходимо располагать данными о геометрических параметрах зоны ВПД в обрабатываемом материале (стружке). Такими параметрами являются средняя толщина деформированного слоя h_c или характер изменения толщины слоя ВПД вдоль длины контакта $h = f(x)$. Точные размеры пластически деформированного слоя могут быть получены в результате изучения микрошлифов корней стружки, полученных в процессе резания или на установке Сплита-Хопкинсона (Split-Hopkinson bar test) [11, 12]. Одним из наиболее перспективных современных способов определения характеристик различных физико-механических и тепловых процессов является моделирование методом конечных элементов (МКЭ) [5, 11]. Использование данного метода с применением ряда входных параметров, полученных в ходе натурального эксперимента, позволяет получить достаточно точные результаты с минимальными ресурсными и временными затратами [11].

Настоящая работа посвящена моделированию температурного распределения на рабочих поверхностях токарного резца с учётом геометрических параметров пластически деформированного слоя в обрабатываемом материале.

микроскопии. Температура в заданной контрольной точке определялась методом искусственной термопары, для чего внутри отверстия в режущей пластине приваривалась хромель алюмелевая проволока так, как показано на рис. 1.

Расчёт температуры на контактных поверхностях инструмента осуществлялось для момента в эволюции системы, соответствующего пути резания $L = 600$ м.

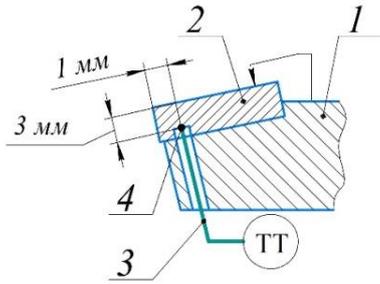


Рис. 1. Схема измерения температуры:
1 – державка; 2 – режущая
пластина; 3 – термопара;
4 – контрольная точка измерения
Fig. 1. Temperature measurement scheme:
1 – holder; 2 – cutting plate;
3 – thermocouple; 4 – control
point of measurement

Согласно результатам натурального эксперимента, длина контакта стружки с передней поверхностью составляла в этот момент $l_k = 1,59$ мм, длина участка ВПД $l_l = l_k / 2 = 0,795$ мм, а температура в контрольной точке $T_{км} = 272,2$ °С. Значение

$$T(x, h) = \left[\frac{\omega_{01}}{k_1 + m_1} + \frac{\omega_{02}}{\frac{x}{V_c} k_2^3 a_2} \left(\frac{x}{V_c} k_2^3 a_2 + 1 - 2k_2 \sqrt{a_2 \frac{x}{V_c}} \frac{1}{\pi} - \exp\left(\frac{x}{V_c} k_2^2 a_2\right) \operatorname{erfc}\left(k_2 \sqrt{a_2 \frac{x}{V_c}}\right) \right) \right] \cdot \left(\lambda_1 m_1 + \frac{2\lambda_2}{\pi a_2 \frac{x}{V_c}} \right)^{-1} \quad (1)$$

где $x = 0 \dots l_k / 2$; ω_{02} – начальная плотность источника тепловыделения в заготовке:

$$\omega_{02} = \frac{q_0 k t_H}{t_{nt} h \left(1 - \exp\left(-k \frac{t_H}{t_{nt}}\right) \right)} \quad (2)$$

Полный перечень физических величин, входящих в формулы (1) и (2), приводится в Прил. А к данной статье.

Моделирование деформационных процессов осуществлялось для трёхмерной модели фрагмента стружки, высота и ширина поперечного сечения которого совпадают с размерами срезаемого слоя ($a = 1,6$ мм; $b = 2,3$ мм), а его длина $H = l_k = 1,59$ мм (рис. 2).

К двум граням модели приложена температура $T_{ппд}$, поступающая в обрабатываемый материал в результате тепловыделения на участке ППД; все остальные грани подвергнуты воздействию темпера-

поверхностной контактной температуры T_k рассчитывалось на основании данных измерений в контрольной точке по выражению, описывающему температурное распределение в стержне:

$$T(y) = (T_k - T_0) \exp\left(-\frac{\sqrt{Bi}}{\delta} y\right) + T_0,$$

где δ – отношение площади сечения стержня к его периметру; Bi – критерий Био; T_0 – температура окружающей среды, y – расстояние от поверхности контакта до контрольной точки измерения, $y = 3$ мм.

Расчётная температура на поверхности резца по результатам натурального эксперимента составила $T_k = 887$ °С. Построение теоретического температурного распределения по длине контакта на передней поверхности инструмента на участке ВПД производилось по зависимости Чичинадзе-Шучева [9]:

туры окружающей среды T_0 (на рис. 2 не указано). Также к поверхности модели приложено действие средних касательных напряжений на передней поверхности τ_k . Статический расчёт модели производился в приложении конечно-элементного анализа *APM FEM*.

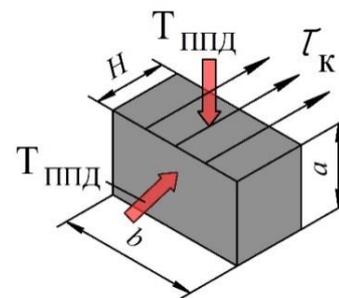


Рис. 2. Геометрические параметры трёхмерной модели фрагмента стружки и схема приложенных нагрузок
Fig. 2. Geometric parameters of chip fragment 3D model and the loads scheme

Результаты

Моделирование деформационных процессов позволило определить форму слоя ВПД в обрабатываемом материале, сформировавшегося под действием приложенных нагрузок. Для определения его геометрических параметров рассчитывался коэффициент запаса прочности по пределу текучести k_T , определяемый как $k_T = \sigma_T / SVM$, где SVM – суммарные напряжения по Мизесу, а σ_T – предел текучести. Затем при формировании карты результатов использовался фильтр, позволя-

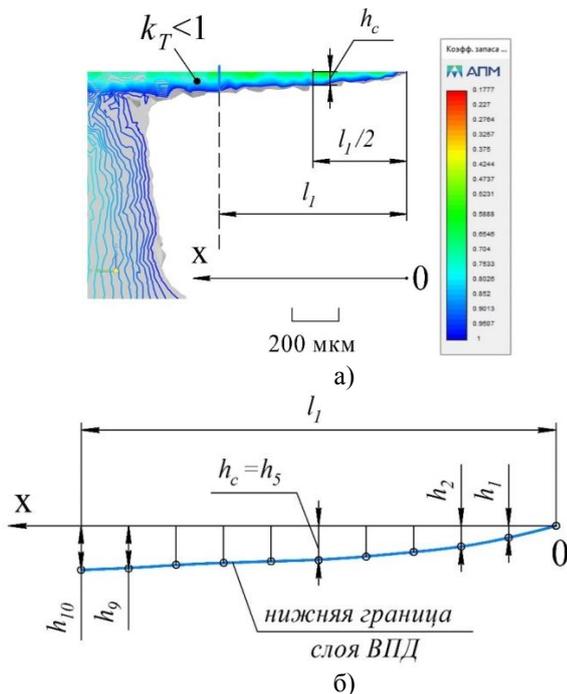


Рис. 3. Пластически деформированный слой в стружке по результатам МКЭ-моделирования:
а) коэффициент запаса прочности по пределу текучести k_T ;

б) геометрические параметры деформированного слоя

Fig. 3. Plastically deformed layer in a chip according to the results of FEM modeling:

a) safety factor for yield strength k_T ;

b) geometric parameters of the deformed layer

При использовании средней толщины слоя ВПД $h(x) = const = h_c$ в расчётах по зависимости (1) температурное распределение имеет форму, представленную на рис. 4, п. 1; среднее значение температуры контакта в этом случае составило $848,6^\circ\text{C}$. Для $x = 0$ использовано значение температуры, полученной стружкой в результате первичных пластических деформаций.

Ющий визуализировать только выбранные изообласти с параметром $k_T < 1$. Результаты моделирования и геометрические параметры слоя ВПД в продольном сечении модели фрагмента стружки представлены на рис. 3 а. Профиль нижней границы зоны ВПД получен графическим методом путём аппроксимации сплайном (полином 5-й степени) контура пластически деформированного слоя по результатам МКЭ расчёта, далее были произведены замеры толщины слоя h_i для 10 точек (рис. 3 б).

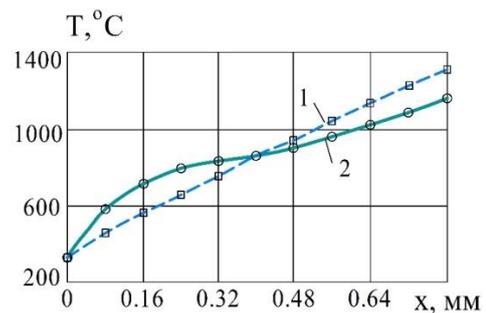


Рис. 4. Температурное распределение на передней поверхности резца:

1 – $h = const$; 2 – $h = f(x)$

Fig. 4. Temperature distribution on the rake face of the lathe cutter:

1 – $h = const$; 2 – $h = f(x)$

В случае же, когда толщина слоя ВПД изменяется вдоль оси x согласно рис. 3 б, среднее значение температуры поверхности составляет $836,7^\circ\text{C}$. В обоих случаях расчётные данные удовлетворительно соотносятся с результатами натурального эксперимента, погрешности для вариантов $h(x) = const$ и $h = f(x)$ составили 4,3 % и 5,6 % соответственно. Несмотря на небольшую разницу между средними значениями поверхностной температуры, полученной в результате расчёта двумя различными способами (погрешность менее 1,5 %), отличие между максимальными значениями температуры на передней поверхности существенны. При подстановке средней толщины слоя ВПД в формулу (1) расчётная температура при $x = l_1$ составляет 1325°C , тогда как при расчёте с учётом переменной толщины слоя её значение составило 1190°C (отклонение 11 %).

Заключение

Моделирование деформационных процессов в стружке методом конечных элементов позволило определить характер изменения толщины ВПД слоя на контакте с передней поверхностью резца. Сравнение температурных кривых, построенных как с использованием постоянной средней толщины деформированного слоя, так и с учётом изменения толщины ВПД показало, что:

1) средние температуры поверхности для двух вариантов расчёта отличаются незначительно и в обоих случаях хорошо соотносятся с результатами натурного эксперимента;

2) максимальные значения температуры на передней поверхности резца для рассмотренных вариантов расчёта отличаются существенно.

Таким образом, для определения средней температуры передней поверхности на участке ВПД может быть использовано среднее значение толщины деформированного слоя. В случае решения задач, связанных с определением максимальной температуры в зоне резания целесообразно учитывать изменение толщины пластически деформированного слоя в стружке вдоль передней поверхности резца.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Обозначения физических величин

ω_{01} – максимальная объемная плотность источника тепловыделения от сил трения в теле инструмента, Вт/м²;

q_0 – удельная мощность трения для передней поверхности, Вт/м²;

$k_{1,2}$ – коэффициенты локализации источника теплопоглощения для инструмента и обрабатываемого материала, м⁻¹;

a_2 – коэффициент температуропроводности заготовки, м²/с;

$\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности твёрдого сплава и материала заготовки соответственно, Вт/м·°С;

V_c – скорость движения стружки по передней поверхности, м/с;

τ_k – средние касательные напряжения на передней поверхности, Па;

t_{nl} – температура плавления материала заготовки, °С;

k – температурный коэффициент [°С],
 $k = 7,143 \cdot 10^{-4} \cdot t_{nl}$;

t_H – перепад температур внутри пластически деформированного слоя, °С.

$$m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_1 \left(\frac{A_k}{P_k} \right)}}$$

где A_k – площадь контакта, м²; P_k – периметр контакта, м; α_1 – коэффициент теплоотдачи инструментального материала, м²/°С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Patel K.V et al. Physics-Based Simulations of Chip Flow over Micro-Textured Cutting Tool in Orthogonal Cutting of Alloy Steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021;5,65.
2. Botkina D. et al. Digital Twin of a Cutting Tool. *Procedia CIRP*. 2018; 72:215–218.
3. Thangarasu S.K et al. Tool wear prediction in hard turning of EN8 steel using cutting force and surface roughness with artificial neural network. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019;234: 329–342.
4. Dahbi S. et al. Modeling of cutting performances in turning process using artificial neural networks. *International Journal of Engineering Business Management*. 2017;1.
5. Ahmed W. et al. Estimation of temperature in machining with self-propelled rotary tools using finite element method, *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;61:100–110.
6. Veiga F. et al. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent thermal conductivity. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;204: 106524.
7. Gutema E.M. et al. Minimization of Surface Roughness and Temperature during Turning of Aluminum 6061 Using Response Surface Methodology and Desirability Function Analysis. *Materials*. 2021;15:7638.
8. D'Addona D et al. Thermal Modeling of Tool Temperature Distribution during High Pressure Coolant Assisted Turning of Inconel 718. *Materials* 2019;12.
9. Чичинадзе А.В. Температурный режим при трении инструментальных материалов с учётом объёмности источника тепловыделения. *Трение и износ*. 1986;7:43–51.
10. Рыжкин А.А. Применение гидродинамических аналогий для оценки контактной температуры инструмента при высокоскоростной обработке.

Вестник ДГТУ. Сер. Трение и износ. 2000;3:35–42.

11. Grzesik W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applica-

REFERENCES

1. Patel KV. Physics-based simulations of chip flow over micro-textured cutting tool in orthogonal cutting of alloy steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021;5:65.
2. Botkina D. Digital twin of a cutting tool. *Procedia CIRP*. 2018; 72:215–218.
3. Thangarasu SK. Tool wear prediction in hard turning of EN8 steel using cutting force and surface roughness with artificial neural network. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019;234: 329–342.
4. Dahbi S. Modeling of cutting performances in turning process using artificial neural networks. *International Journal of Engineering Business Management*. 2017;1.
5. Ahmed W. Estimation of temperature in machining with self-propelled rotary tools using finite element method. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;61:100–110.
6. Veiga F. Analytical thermal model of orthogonal cutting process for predicting the temperature of the cutting tool with temperature-dependent ther-

mal conductivity. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;204: 106524.

12. Budiwantoro B. et al. The Influence of Shear Angles on the Split Hopkinson Shear Bar Testing. *International Journal of Impact Engineering*. 2021;149:103787.

7. Gutema EM. Minimization of Surface Roughness and Temperature during Turning of Aluminum 6061 Using Response Surface Methodology and Desirability Function Analysis. *Materials*. 2021;15:7638.
8. D'Addona D. Thermal modeling of tool temperature distribution during high pressure coolant assisted turning of inconel 718. *Materials* 2019;12.
9. Chichinadze AV. Temperature regime during friction of tool materials taking into account the volume of the heat source. *Friction and Wear*. 1986;7:43-51.
10. Ryzhkin AA. Application of hydrodynamic analogies to assess the contact temperature of the tool during high-speed machining. *Vestnik DGTU. Friction and Wear*. 2000;3:35-42.
11. Grzesik W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling, and applications. 2nd ed. Elsevier; 2017.
12. Budiwantoro B. The Influence of shear angles on the split hopkinson shear bar testing. *International Journal of Impact Engineering*. 2021;149:103787.

Информация об авторах:

Фоминов Евгений Валерьевич – кандидат технических наук, тел. +7(918)507-54-43, доцент, международные идентификационные номера автора Researcher ID: V-77225-2018, Scopus ID 57188653761, ORCID 0000-0002-0165-7536.

Марченко Андрей Анатольевич – аспирант, тел. :+7 (812) 331-93-31, международные идентификационные номера автора: ORCID 0000-0003-4028-6712, tobago13@yandex.ru.

Сухомлинова Виктория Викторовна – старший преподаватель, тел.+7(903)4342716, SPIN-код 3356-3382, международные идентификационные номера

Fominov Evgeny Valeryevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; phone: +7(918)507-54-43; Researcher ID: V-77225-2018, Scopus ID 57188653761, ORCID 0000-0002-0165-7536.

Marchenko Andrey Anatolyevich - Postgraduate Student; phone: +7 (812) 331-93-31; ORCID 0000-0003-4028-6712, tobago13@yandex.ru.

Sukhomlinova Victoria Viktorovna - Senior Lecturer; phone: +7(903)4342716; SPIN-code 3356-3382;

автора ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5436-4756>, e-mail: sigen-67@mail.ru.

Пятницкая Оксана Александровна – старший преподаватель, тел. +7(918)513-52-06, международные идентификационные номера автора: Scopus ID 57218107382, ORCID 0000-0003-4195-2190, e-mail: f972@yandex.ru.

Гладких Дмитрий Игоревич – аспирант, тел. +7(988)581-78-01, международные идентификационные номера автора: Researcher ID: HDM-6104-2022, ORCID 0000-0003-2292-256X. e-mail: ya.gladckih-dmitriy@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5436-4756>, e-mail: sigen-67@mail.ru.

Pyatnitskaya Oksana Aleksandrovna - Senior Lecturer; phone: +7(918)513-52-06; Scopus ID 57218107382, ORCID 0000-0003-4195-2190, e-mail: f972@yandex.ru.

Gladckikh Dmitry Igorevich - Postgraduate Student; phone: +7(988)581-78-01; Researcher ID: HDM-6104-2022, ORCID 0000-0003-2292-256X. e-mail: ya.gladckih-dmitriy@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 24.11.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 26.01.2023. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 24.11.2022; approved after review on 30.11.2022; accepted for publication on 26.01.2023. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.