

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 621.91.01
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187586>
EDN: <https://www.elibrary.ru/LAGCYI>



Прогнозирование бессеточным численным методом напряженно-деформированного состояния и механизма разрушения титанового сплава ВТ6 при обработке резанием

Мохамад Шериф Эль Сайед Ахмед Солиман^{1✉}, Александр Георгиевич Анисимов²

^{1, 2} Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

¹ ahmedsoliman@hydro.nsc.ru[✉]

² anis@hydro.nsc.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы применения бессеточного численного метода Smoothed Particle Galerkin (SPG) для прогнозирования напряженно-деформированного состояния и механизма разрушения титанового сплава ВТ6 при высокоскоростном ортогональном резании. Численное моделирование проводится в условиях интенсивного упругопластического деформирования материала, характерных для процессов обработки титановых сплавов резанием.

Основное внимание уделено анализу пространственно-временной эволюции напряжений и пластических деформаций в зоне резания, локализации напряженно-деформированного состояния в первичной зоне сдвига и установлению их связи с механизмами инициирования и развития разрушения материала. Формирование сегментированной стружки рассматривается как следствие локализации пластической деформации и накопления повреждения в областях повышенной концентрации напряжений, без задания априорной геометрии зоны разрушения.

Метод SPG, основанный на вариационной галеркинской форме уравнений механики сплошной среды, обеспечивает корректное моделирование больших деформаций и высоких скоростей деформирования без использования расчетной сетки. Контактное взаимодействие между инструментом, заготовкой и формируемой стружкой реализуется на уровне частиц, что позволяет воспроизводить разделение материала и процесс разрушения в рамках единой численной схемы без применения процедур удаления или перестройки элементов.

Численная устойчивость расчетной схемы обеспечивается специальными стабилизационными механизмами, сохраняющими линейную точность аппроксимации при моделировании локализованного пластического течения. Разрушение материала и формирование стружки описываются с использованием феноменологической модели повреждения Джонсона–Кука, что позволяет связать параметры напряженно-деформированного состояния с условиями инициирования разрушения.

Результаты численного моделирования демонстрируют возможность прогноза распределений напряжений, интенсивности пластических деформаций и зон локализации повреждения при высокоскоростной обработке титанового сплава ВТ6.

Ключевые слова: численное моделирование процесса резания, ортогональная схема обработки, напряженно-деформированное состояние, механизм разрушения, метод Smoothed Particle Galerkin, бессеточные методы, титановый сплав ВТ6, модель Джонсона–Кука, сегментированная стружка

Для цитирования: Ахмед Солиман М.Э., Анисимов А.Г. Прогнозирование бессеточным численным методом напряженно-деформированного состояния и механизма разрушения титанового сплава ВТ6 при обработке резанием // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 1. С. 154–165. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187586>

©Ахмед Солиман М.Э., Анисимов А.Г., 2026

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Prediction of the Stress–Strain State and Failure Mechanism of the VT6 Titanium Alloy during Machining Using a Meshfree Numerical Method

Mohamed Sherif El Sayed Ahmed Soliman^{1✉}, Aleksandr G. Anisimov²

^{1,2} Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

¹ ahmedsoliman@hydro.nsc.ru✉

² anis@hydro.nsc.ru

Abstract

This work presents a numerical investigation of high-speed orthogonal cutting of the aerospace titanium alloy VT6 (Ti–6Al–4V) using the meshless Smoothed Particle Galerkin (SPG) method. The relevance of the study is driven by the increasing demand for reliable predictive tools capable of describing the stress–strain state and material separation mechanisms during the machining of titanium alloys, which are extensively used in aerospace and space engineering. The combination of high strength, low thermal conductivity, and pronounced tendency toward plastic strain localization makes these alloys particularly difficult to machine and requires advanced numerical approaches that can accurately capture large deformations and fracture processes.

The SPG method employed in this study is based on a variational Galerkin formulation of the governing equations of continuum mechanics and does not rely on a fixed computational mesh. This feature allows one to overcome numerical difficulties inherent in conventional mesh-based methods, such as severe mesh distortion and the need for remeshing under large plastic deformations. Contact interaction between the cutting tool, the workpiece, and the evolving chip is naturally described at the particle level, ensuring physically consistent material separation and chip formation without prescribing an a priori fracture path or geometrical failure criteria.

Particular attention is devoted to the numerical stability of Galerkin-type meshless formulations. The study considers physically motivated stabilization techniques based on local deformation smoothing and consistent treatment of kinematic relations in the vicinity of particles. This approach effectively suppresses nonphysical displacement modes, analogous to hourglass modes in reduced-integration finite element schemes, without introducing empirical stabilization parameters and while preserving the variational consistency of the numerical formulation.

The elastoplastic response of the titanium alloy is described using the Johnson–Cook constitutive model, which accounts for strain hardening, strain-rate sensitivity, and thermal softening effects characteristic of high-speed cutting conditions. Numerical simulations reproduce key features of high-speed orthogonal cutting of VT6 alloy, including the formation of the primary shear zone, strong localization of plastic deformation, and the development of segmented chip morphology. These results demonstrate the capability of the SPG method to capture the essential physical mechanisms governing material flow and chip formation under extreme deformation rates.

The findings contribute to the advancement of numerical technologies for the analysis of high-speed machining processes and provide a reliable computational framework for predicting the stress–strain state of the surface layer and chip formation conditions. From a practical standpoint, the proposed approach offers a foundation for optimizing cutting parameters, reducing the reliance on costly experimental trials, and improving material utilization efficiency in aerospace manufacturing and related high-technology industries.

Keywords: numerical modeling of the cutting process, orthogonal cutting scheme, stress-strain state, fracture mechanism, Smoothed Particle Galerkin method, meshless methods, VT6 (Ti–6Al–4V) alloy, Johnson–Cook; segmented chips

For citation: Ahmed Soliman M.E., Anisimov A.G. Prediction of the Stress–Strain State and Failure Mechanism of the VT6 Titanium Alloy during Machining Using a Meshfree Numerical Method. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(1):154–165. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187586>

List of Figures

Fig. 1. Orthogonal cutting computational scheme for an aerospace-grade titanium alloy with combined SPG-FEM approximation

Fig. 2. Morphological features of the chip a Fig. 3. Morphology of segmented VT6 (Ti-6Al-4V) at $\gamma = 12^\circ$: a – $V_c = 15$ m/s; b – $V_c = 35$ m/s; c – $V_c = 60$ m/s increasing cutting speed

Fig. 3. Morphology of segmented VT6 (Ti-6Al-4V) at $\gamma = 12^\circ$: a – $V_c = 15$ m/s; b – $V_c = 35$ m/s; c – $V_c = 60$ m/s

Fig. 4. SEM image of segmented VT6 chips showing the formation of individual segments before and after passing through the shear zone [15]

Fig. 5. Time history of the calculated force F_c .

Введение

Бессеточные численные методы в последние годы получили широкое развитие при решении задач металловедения и технологии обработки металлов и сплавов, связанных с анализом процессов, сопровождающихся большими деформациями, локализацией напряженно-деформированного состояния (НДС) и нарушением сплошности материала.

Подобные условия характерны для процессов высокоскоростной механической обработки, резания и формоизменения металлов, применяемых при изготовлении ответственных деталей авиационной и ракетно-космической техники. Обзор современных подходов к численному моделированию таких процессов показывает, что применение традиционных сеточных методов сталкивается с существенными трудностями, связанными с искажением расчетной сетки и необходимостью ее адаптации при описании интенсивных упруго-пластических деформаций материала и ограничивающими возможности достоверного прогноза напряжений, деформаций и разрушения материала в зоне обработке [1, 2].

Одним из перспективных бессеточных подходов является метод SPG, в котором аппроксимация искомых полей осуществляется на дискретном множестве частиц без использования фиксированной расчетной сетки. Такой подход позволяет естественным образом описывать упруго-пластическое поведение металлических материалов, эволюцию НДС, локализацию деформаций, разделение материала и формирование стружки, что особенно важно при моделировании процессов обработки металлов резанием [3, 4]. Благодаря отказу от сеточной структуры исключается необходимость процедур перестроения элементов и повышается устойчивость расчетов при экстремальных режимах технологического нагружения, характерных для высокоскоростного резания титановых сплавов [5].

Вместе с тем галеркинский бессеточный метод приводит к численно неустойчивым решениям, аналогичным «часовым» модам, известным в конечно-элементных схемах с ограниченным интегрированием [6, 7]. Традиционные методы стабилизации

часто основываются на введении дополнительных эмпирических параметров, выбор которых не всегда имеет строгую физическую интерпретацию с позиций металловедения и физики деформации металлов. В этой связи особый интерес представляют физически мотивированные схемы стабилизации, не требующие подбора коэффициентов и обеспечивающие вариационную согласованность численной схемы при моделировании процессов пластического течения металлических материалов, а также при анализе НДС и инициирования разрушения [8, 9].

Физическая стабилизация в методе SPG реализуется благодаря учету дополнительных членов, возникающих при локальном разложении кинематических соотношений, а также использованию ограниченных интеграционных областей, ассоциированных с частицами. В сочетании с процедурами сглаживания деформаций такая стратегия позволяет подавлять нефизические моды перемещений и обеспечивать устойчивость численного решения при сохранении линейной точности аппроксимации, что является принципиально важным при численном анализе технологических процессов обработки металлов, ориентированном на прогноз распределений напряжений и локализации деформаций [10]. Существенным преимуществом данного подхода является отсутствие необходимости вычисления производных аппроксимирующих функций, что упрощает реализацию метода и снижает вычислительные затраты при моделировании реальных технологических режимов обработки [11].

Далее рассматривается модельная задача статического нагружения линейно-упругого тела в условиях плоской деформации, используемая как базовая расчетная постановка для верификации численных схем, применяемых в дальнейшем при анализе НДС материала в зоне резания. Пусть ограниченная область $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ имеет кусочно-гладкую границу $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t$, $\Gamma_u \cap \Gamma_t = \emptyset$, на которой заданы кинематические и силовые граничные условия. Для векторного поля перемещений и объемной нагрузки $f \in L^2(\Omega)$, уравнения равновесия записываются в операторной форме [12]:

$$\mathcal{A}(u) = -f \text{ в } \Omega,$$

где $\mathcal{A}(u)$ – оператор внутреннего силового отклика, который сопоставляет поле перемещений с возникающими в материале внутренними силами, возникающими из-за упругопластической деформации. Проще говоря, это математическая запись того, как тело «отвечает» на деформацию: чем больше локальная деформация, тем больше внутренние реакции (напряжения), удерживающие тело в равновесии; f – вектор объемной нагрузки, Н/м². Внутренний отклик измеряется в единицах напряжений Па = Н/м², поскольку он участвует в интеграле внутренней работы [13], с граничными условиями:

$$u = u_0 \text{ на } \Gamma_u; \mathcal{T}(u) = t_0 \text{ на } \Gamma_t,$$

где u_0 – заданный вектор перемещений, м; $\mathcal{T}(u)$ – оператор поверхностных напряжений, Н/м²; t_0 – заданный вектор напряжений на границе, Н/м² [14].

Кинематические соотношения формулируются в предположении малых деформаций и задаются симметризованным градиентом поля перемещений [15]:

$$\varepsilon(u) = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T],$$

где $\varepsilon(u)$ – тензор деформаций (безразмерный); ∇u – градиент перемещений (м/м, безразмерный) [16].

Связь между напряжениями и деформациями принимается линейной и изотропной:

$$\sigma = C : \varepsilon,$$

где σ – тензор напряжений, Н/м²; C – тензор упругих модулей, который определяется через модуль Юнга E в паскалях и коэффициент Пуассона ν (безразмерный), что исключает необходимость явного задания коэффициентов Ламе [17].

Вариационная формулировка задачи сводится к поиску поля перемещений $u \in v$, которое удовлетворяет наложенным кинематическим условиям и обеспечивает равенство внутренней и внешней работы для любого допустимого виртуального смещения $\Delta u \in v_0$ [18]. Пространство виртуальных перемещений выбирается с учетом выполнения граничных условий на Γ_u :

$$\int_{\Omega} \sigma : \varepsilon(\delta u) d\Omega = \int_{\Omega} f \cdot \delta u d\Omega + \int_{\Gamma} t_0 \cdot \delta u d\Gamma,$$

где δu – допустимое виртуальное перемещение, м; v_0 – пространство виртуальных перемещений, обращаясь в нуль на границе на Γ_u ; $\sigma : \varepsilon$ – двойное свертывание тензоров напряжений и виртуальных деформаций, Н/м² × безразмерный = Н/м², интегралы берутся по области Ω (м²) и границе Γ , (м) [19].

Особая актуальность рассматриваемой задачи обусловлена потребностями авиационного и ракет-

но-космического машиностроения, где широкое применение находят титановые сплавы как объекты металловедения и термической и механической обработки, в том числе ВТ6, обладающий высокой удельной прочностью и жаростойкостью. Высокоскоростная механическая обработка таких материалов сопровождается интенсивными упруго-пластическими деформациями, локализацией НДС и развитием механизмов разрушения, что обуславливает повышенные требования к достоверности численного моделирования структурно-механического поведения металла в зоне резания. В этом контексте развитие вариационных бессеточных методов металловедения и технологии обработки металлов и сплавов представляет практический интерес для прогноза НДС и оценки условий разрушения материала в аэрокосмической отрасли [20].

1. Описание численной модели и условий обработки

Численное моделирование процесса ортогонального сухого резания титанового сплава ВТ6 выполнено в программном комплексе LS-DYNA в трехмерной расчетной постановке, основанной на методе Smoothed Particle Galerkin (SPG). Модель ориентирована на прогноз пространственно-временной эволюции НДС материала и анализ механизмов разрушения в зоне резания.

Численная постановка разработана для анализа структурно-механического поведения титановых сплавов, применяемых в авиационном и ракетно-космическом машиностроении, с целью исследования упругопластического деформирования материала, распределений напряжений, интенсивности пластических деформаций и характеристик стружки. Это особенно важно при разработке технологических режимов обработки титановых сплавов аэрокосмического назначения.

Часть заготовки, не испытывающая интенсивных деформаций, описана с использованием классической конечно-элементной аппроксимации, что позволило существенно сократить вычислительные затраты при сохранении достоверности описания процессов в зоне резания.

Разграничение бессеточной и конечно-элементной областей реализуется через различные расчетные секции в LS-DYNA, аналогично подходам при моделировании технологических процессов высокоскоростной обработки. На этапе формирования модели верхний слой заготовки сначала задавался объемными конечными элементами, которые затем заменялись частицами SPG, в то время как описание нижней области осталось конечно-элементным. Это обеспечило корректный переход напряжений и деформаций между различными областями аппроксимации.

Режущий инструмент рассматривался как жесткое тело, что является стандартным допущением при моделировании процессов резания титановых сплавов и позволяет сосредоточить внимание на НДС обрабатываемого материала.

Граничные и кинематические условия: нижняя поверхность заготовки жестко зафиксирована по всем степеням свободы, а движение инструмента происходит с постоянной поступательной скоростью, соответствующей скорости резания. Контактное взаимодействие между инструментом и заготовкой описано моделью сухого сдвигового трения с коэффициентом трения $\mu = 0,5$, что согласуется с известными данными для высокоскоростного резания титановых сплавов.

Схема расчетной модели ортогонального резания с комбинированной SPG–МКЭ аппроксимацией представлена на рис. 1.

2. Описание материала

Поведение материала заготовки в расчетах методом SPG моделировалось с использованием феноменологической модели Джонсона–Кука, описывающей упругопластический отклик материалов при динамических нагрузках. Эта модель позволяет точно воспроизводить пластическое течение и термическое разупрочнение титановых сплавов, которые используются в аэрокосмической отрасли, где важны жаропрочность и стабильность механических свойств.

Модель Джонсона–Кука учитывает влияние накопленной пластической деформации, скорости ее изменения и температуры материала, что особенно важно при моделировании ортогонального резания титановых сплавов. Эти материалы характеризуются выраженным деформационным упрочнением, высокой чувствительностью к скорости деформации и интенсивным термическим размягчением поверхностного слоя в зоне сдвига.

В условиях высокоскоростной обработки локальные скорости деформации могут достигать $\sim 10^3 - 10^5 \text{ с}^{-1}$, а температура в зоне сдвига приближается к температуре плавления, что подтверждает применимость модели Джонсона–Кука для описания рассматриваемых процессов. Эквивалентное напряжение пластического течения в модели Джонсона–Кука задается как функция накопленной пластической деформации, скорости деформации и температуры:

$$\bar{\sigma} = \left(A + B\bar{\epsilon}^n \right) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_{\text{оп}}} \right) \right] \times \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{нач}}}{T_{\text{пл}} - T_{\text{нач}}} \right)^k \right],$$

где $\bar{\sigma}$ – эквивалентное напряжение пластического течения, Н/м^2 ;

$\bar{\epsilon}$ – накопленная пластическая деформация безразмерная;

$\dot{\bar{\epsilon}}$ – скорость пластической деформации, нормированная на опорное значение $\dot{\bar{\epsilon}}_{\text{оп}}$ (безразмерная);

T – текущая температура материала, К ;

$T_{\text{нач}}$ – начальная (опорная) температура материала, К ;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала.

Параметры A, B, C и k являются эмпирическими константами материала и определяются на основе экспериментальных данных для титанового сплава ВТ6.

Для моделирования процесса разрушения применялась модель повреждения Джонсона–Кука, где предельная пластическая деформация до разрушения зависит от напряженного состояния, скорости деформации и температуры. Эта модель позволяет адекватно воспроизводить процесс формирования сегментированной стружки при резании, что важно для прогнозирования технологической обрабатываемости и повышения надежности деталей аэрокосмического назначения.

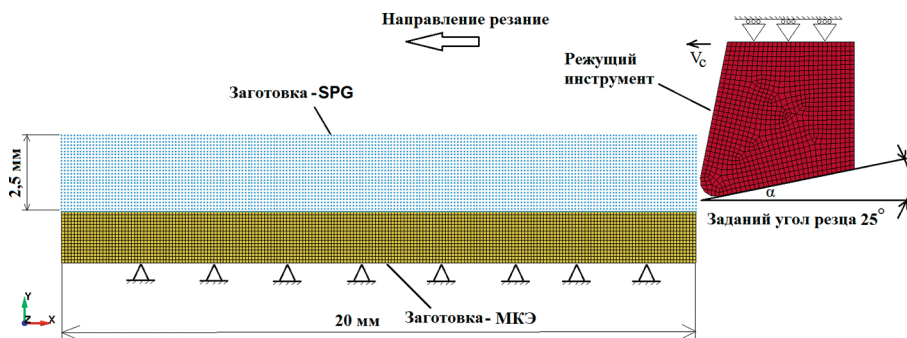


Рис. 1. Расчетная схема ортогонального резания титанового сплава аэрокосмического назначения с комбинированной SPG–МКЭ–аппроксимацией

3. Морфология и структура стружки титанового сплава ВТ6

Геометрия и структура стружки, образующейся при механической обработке титанового сплава ВТ6, определяются сочетанием упругопластических и термомеханических свойств материала и параметров резания. Это приводит к выраженной неоднородности пластической деформации и локализации сдвиговых процессов, что важно для прогнозирования состояния приповерхностного слоя деталей аэрокосмического назначения. В рассматриваемом диапазоне режимов наблюдается формирование как непрерывной, так и сегментированной стружки. Сегментированная стружка формируется из-за развития адиабатических полос сдвига и интенсивного термического размягчения материала, что отражает сочетание механических и термомеханических характеристик сплава.

Внутренняя структура стружки ВТ6 характеризуется неоднородностью деформации и наличием зон интенсивного сдвига, что подтверждается как экспериментальными, так и численными данными. Понимание этих процессов важно для обеспечения структурной целостности материала при термообработке и эксплуатации авиационных и ракетно-космических деталей. Изменение геометрии инструмента, особенно переднего угла режущей кромки, существенно влияет на длину сегментов и механизм стружкообразования, что согласуется с данными из литературы по высокоскоростному резанию титановых сплавов.

3.1. Геометрия ортогонального резания при переднем угле $\gamma = 0^\circ$

Для анализа влияния скорости резания на механизм формирования стружки выполнено численное моделирование процесса ортогонального резания с применением метода SPG. Полученные результаты позволяют изучить закономерности упругопластического течения материала с точки зрения металловедения и термической обработки, а также оценить термомеханическую стабильность поверхностного слоя титанового сплава, что важно для аэрокосмического применения. Расчетные данные сопоставлялись с результатами экспериментальных измерений в диапазоне скоростей резания 15–60 м/с (рис. 2).

При минимальной исследуемой скорости резания стружка формируется в устойчивом квазинепрерывном режиме. Пластическое течение материала сконцентрировано преимущественно в зоне первичного сдвига и в узкой области контактного взаимодействия инструмент–стружка, что отражает локализацию термомеханических эффектов и структурное поведение материала,

актуальное для оценки качества его обработки. Такой характер распределения деформаций соответствует типичным экспериментальным данным для обработки титановых сплавов при умеренных скоростях резания (рис. 2, а и б).

Повышение скорости резания до $V_c = 35$ м/с приводит к заметному усилению пластического течения как в первичной зоне сдвига, так и в области трения на границе инструмент–стружка (рис. 2, в и г). При этом эквивалентная пластическая деформация в указанных зонах существенно превышает средний

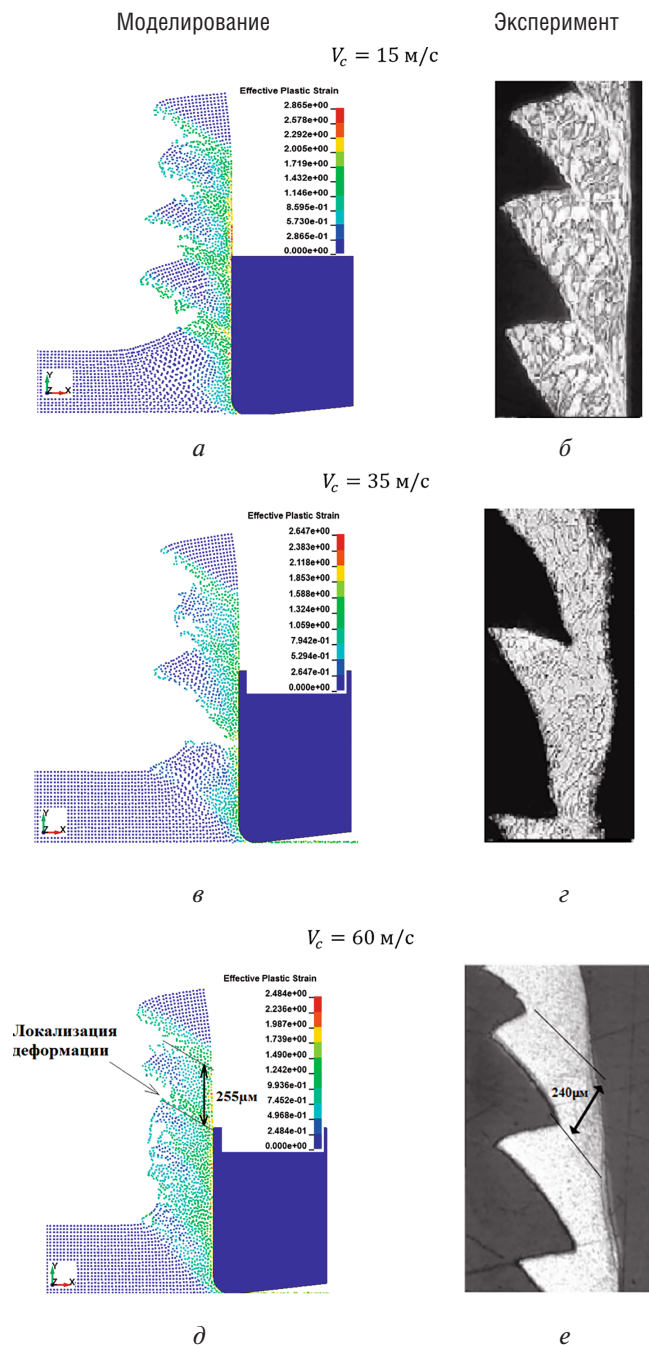


Рис. 2. Морфологические особенности стружки при увеличении скорости резания

уровень в объеме заготовки, что указывает на развитие выраженной деформационной локализации и усиление термомеханических эффектов, критически важных для прогнозирования поведения поверхности и ресурса аэрокосмических деталей.

Таким образом, численная модель SPG демонстрирует способность корректно воспроизводить пространственное распределение деформаций и характер формирования стружки при ортогональном резании, обеспечивая при этом физически корректное описание упругопластического поведения материала с точки зрения металлостроения и термической обработки металлов и сплавов, а также хорошее согласование с экспериментальными данными во всем рассматриваемом диапазоне скоростей.

Анализ максимальных значений эквивалентной пластической деформации показывает тенденцию к их снижению — с 2,0 до 1,853 при увеличении скорости резания до 35 м/с. Такое поведение отражает изменение механизма пластической деформации материала при переходе к более интенсивным термомеханическим условиям нагружения, важным для оценки структурной стабильности и ресурсной надежности аэрокосмических деталей.

При дальнейшем увеличении скорости резания титановые заготовки испытывают значительные термомеханические нагрузки, что приводит к локализации пластической деформации и формированию адиабатических полос сдвига. В этих условиях усиливается термическое размягчение материала, обусловленное локальным адиабатическим нагревом в зоне интенсивной пластической деформации, что способствует более раннему зарождению микрповреждений. В результате материал может разрушаться при меньших значениях накопленной пластической деформации, что объясняет наблюдаемое снижение ее максимальных значений.

Дополнительное увеличение скорости деформирования сопровождается ростом температуры в зоне резания, изменяющим соотношение между деформационным упрочнением и термическим размягчением. Это приводит к смещению механизма деформации в сторону локализованного сдвигового течения, характерного для формирования сегментированной (пилообразной) стружки при высокоскоростной обработке титановых сплавов. При скорости резания $V_c = 60$ м/с наблюдается формирование стружки с ярко выраженной локализацией сдвига (рис. 2,д). Отдельные сегменты стружки приобретают волнообразную форму, что отражает периодический характер локализованного термомеханического воздействия и динамической нестабильности пластической деформации мате-

риала, ключевой для металлостроительного анализа аэрокосмических сплавов.

Численное моделирование методом SPG позволяет количественно оценить геометрические параметры локальных полос сдвига и проследить их эволюцию во времени. Расчеты показывают, что характерная толщина локальных полос достигает значений порядка 255 мкм, при этом по мере роста локальной пластической деформации и термического размягчения материала наблюдается снижение частоты сегментации стружки. Данные закономерности имеют непосредственное значение для термического анализа и прогнозирования поведения материала при высокоскоростном резании.

Таким образом, формирование волнообразной сегментированной стружки при высокоскоростном ортогональном резании обусловлено совместным действием локального нагрева, термического размягчения материала и динамической нестабильности пластической деформации, что является ключевым для металлостроения и термической обработки аэрокосмических сплавов. Применение SPG-модели позволяет адекватно воспроизвести как морфологию стружки, так и количественные характеристики полос сдвига, что подтверждает достоверность результатов, полученных с использованием численного подхода, и их согласованность с экспериментальными данными.

3.2. Конфигурация ортогонального резания при переднем угле $\gamma = -12^\circ$

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования морфологии стружки при использовании трехмерной модели SPG для переднего угла $\gamma = -12^\circ$. Исследование направлено на оценку локальных термомеханических процессов в материале и их влияния на структурную стабильность аэрокосмического сплава.

При сравнительно низких скоростях резания формируется преимущественно сегментированная стружка. Основным механизмом ее образования связан с локализацией пластической деформации и термомеханическим размягчением материала, что важно для металлостроительного анализа аэрокосмических компонентов. Сегментация формируется под воздействием развития трещин на наружной поверхности стружки и появления адиабатических полос сдвига, обусловленных локальным преобладанием термического размягчения материала над деформационным упрочнением (рис. 3,б и в).

При увеличении скорости резания макроскопическая структура стружки изменяется: хотя локальная сегментация сохраняется, стружка становится более непрерывной (рис. 3,в). Это подтверждает, что термомеханические условия и скорость дефор-

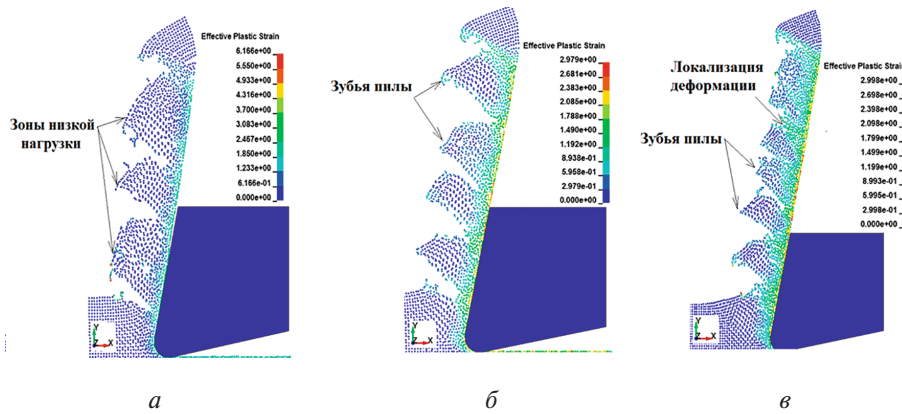


Рис. 3. Морфология сегментированной стружки ВТ6 при $\gamma = 12^\circ$:
 а – $V_c = 15$ м/с; б – $V_c = 35$ м/с; в – $V_c = 60$ м/с

магии оказывают определяющее влияние на структуру материала при аэрокосмическом применении.

Кроме скорости резания, на морфологию стружки влияют микроструктурное состояние материала заготовки и геометрия режущего инструмента, что важно для оценки износостойкости и качества изготовления аэрокосмических деталей. Сравнение передних углов 0° и -12° при скоростях 15, 35 и 60 м/с показало заметные изменения в характере стружкообразования, значениях силы резания и степени износа инструмента. В частности, выявлена прямая зависимость между силой резания и шероховатостью поверхности, критичная для технологического контроля аэрокосмических сплавов.

Сегментированная форма стружки проявляется в периодическом повторении элементов клиновидного очертания, разделенных зонами интенсивного сдвига. При увеличении скорости резания формирование пилообразного профиля стружки сопровождается локальным термомеханическим размягчением материала, а зарождение микротрещин инициируется со стороны свободной поверхности стружки и распространяется к режущей кромке, что отражает особенности микроструктурных изменений и термического состояния материала.

Частоту формирования сегментированной стружки можно оценить шагом зубьев и скоростью резания V_c , что позволяет количественно характеризовать сегментацию и сопоставлять результаты численных расчетов с экспериментальными результатами. Эти оценки имеют прямое отношение к металловедческому анализу поведения сплавов ВТ6 при высокоскоростной обработке для аэрокосмического применения.

4. Влияние скорости резания на сегментацию и локализацию трещин

Численное моделирование показало, что при относительно низких скоростях резания иниции-

рование микротрещин предшествует развитию неустойчивостей пластического течения. Разрушение описывалось энергетическим критерием пластического повреждения, что позволило корректно воспроизвести сегментацию стружки и локализацию разрыва материала в первичной зоне сдвига.

Согласно данным (рис. 4), сегментированная стружка формируется в широком диапазоне скоростей резания. При экстремально высоких скоростях

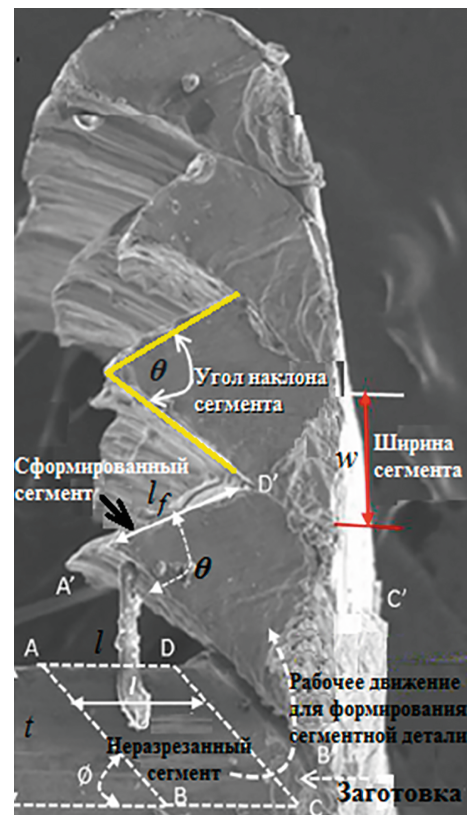


Рис. 4. СЭМ-изображение сегментированной стружки ВТ6, демонстрирующее формирование отдельных сегментов до и после прохождения зоны сдвига [15]

разрушение локализуется преимущественно в пределах первичной зоны сдвига и разделяет соседние полосы интенсивной пластической деформации. Это связано с ростом локальных скоростей деформирования и термомеханического размягчения материала. При менее интенсивных режимах трещинообразование развивается преимущественно со стороны свободной поверхности стружки, что отражает перераспределение зон пластической локализации.

На рис. 4 представлено полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) изображение сегментированной стружки ВТ6. Показано положение сегмента $ABCD$ до входа в зону сдвига и его деформированное состояние $A'B'C'D'$ после прохождения локализованной зоны пластической деформации. Материал сегмента испытывает высокие градиенты напряжений и скоростей деформации, что приводит к формированию узких полос локализованного упруго-пластического течения.

В результате исходная геометрия сегмента существенно трансформируется:

– угол сдвига переходит в угол включения θ ;

– длина сегмента l трансформируется в длину свободной поверхности l_f , толщина – в ширину сегмента w .

Параметры θ , l_f и являются количественными характеристиками локализации деформации и используются для верификации результатов SPG-моделирования на основе сопоставления с СЭМ-данными.

5. Силы резания при высокоскоростной обработке

На рис. 5 представлена временная эволюция прогнозируемой силы резания F_c при скорости резания $V_c = 60$ м/с. Изменение силы носит выраженный квазипериодический характер, что обусловлено сегментированным механизмом формирования стружки и нестационарным течением материала в зоне резания.

Квазипериодические колебания силы резания непосредственно связаны с циклическим зарождением, развитием и разрушением неравновесных деформационных структур НДС в локализованных зонах сдвига. Формирование каждого сегмента стружки сопровождается стадией накопления упруго-пластической деформации, за которой следует быстрая релаксация напряжений при сдвиговой трансформации материала, что и проявляется в виде осцилляций силы резания.

Сопоставление различных численных подходов показывает, что модель SPG демонстрирует тенденцию к некоторому завышению удельных сил резания, тогда как классическая конечно-элемент-

ная модель, напротив, несколько недооценивает их значение. Указанные расхождения объясняются различиями в описании локализации деформации и эволюции НДС: метод SPG более эффективно воспроизводит пространственно-неоднородное упруго-пластическое течение и концентрацию деформаций в узких полосах сдвига, в результате чего увеличивается прогнозируемый уровень сил.

Основным фактором, определяющим силу резания, является деформационное упрочнение титанового сплава ВТ6, реализующееся в процессе формирования и эволюции НДС в зоне сдвига. Накопление дислокаций и развитие неравновесных структур повышают локальное сопротивление материала деформации, что напрямую отражается на уровне силы резания. Вклад термического размягчения материала и условий трения на границе инструмент–стружка в рассматриваемом диапазоне скоростей является второстепенным и не определяет доминирующую динамику силового отклика.

Анализ влияния контактных условий показывает, что увеличение коэффициента трения приводит к росту как продольной, так и поперечной составляющих силы резания. Это связано с усилением передачи нагрузки через контактную зону инструмент–стружка и с изменением условий развития НДС в приповерхностном слое стружки, где трение способствует дополнительной локализации упруго-пластической деформации.

Выводы

1. Численное моделирование показало, что откалиброванные параметры модели Джонсона–Кука в сочетании с методом SPG воспроизводят основные стадии формирования стружки при резании титанового сплава ВТ6.

2. Геометрия и внутренняя структура стружки, определенные путем расчета, согласуются с экспе-

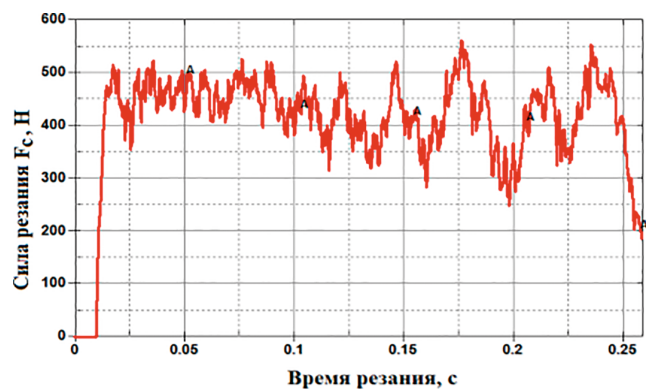


Рис. 5. Зависимость расчетной силы резания F_c от времени

риментальными микроструктурными данными, что подтверждает применимость SPG для моделирования ортогонального резания титановых сплавов.

3. Установлено влияние геометрии инструмента: при переднем угле 0° максимальные нагрузки на режущую кромку ниже, чем при угле -12° . При переднем угле -12° наблюдается усиленная концентрация напряжений вблизи вершины инструмента и интенсифицируется локализованная пластическая деформация в приповерхностной зоне.

4. Высокоскоростная обработка ВТ6 сопровождается развитием интенсивных локальных термомеханических процессов, определяющих эволюцию НДС, износ инструмента и характеристики обработанной поверхности.

5. Метод SPG позволяет количественно описать распределение деформаций, локализацию пластического течения и динамику сил резания, включая переходные режимы между непрерывной и сегментированной формами стружки.

6. Полученные результаты подтверждают перспективность применения SPG при расчетном анализе и оптимизации режимов обработки титановых сплавов.

Список источников

1. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш. и др. Эффективность наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном фрезеровании титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 188–195. DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
2. Дмитриева М.О., Мельников А.А., Носова Е.А. и др. Исследование формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при изготовлении крыльчатки компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя методами аддитивных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 196–203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
3. Кукуджанов В.Н., Левитин А.Л. Численное моделирование процессов резания упруговязкопластических материалов в трехмерной постановке // Известия РАН. Механика твердого тела. 2008. № 3. С. 208–216.
4. Белов А.Н. Исследование процесса стружкообразования при тчении титанового сплава ВТ8 // Вестник СамГТУ. Технические науки. 2013. Т. 21. № 3(39). С. 120–123. DOI: 10.14498/tech.2013.3.%25
5. Рублев Г.Д. Модифицированный осесимметричный контактный метод гидродинамики сглаженных частиц с возможностью моделирования поверхностного натяжения // Вычислительные методы и программирование. 2025. Т. 26. № 4. С. 422–437. DOI: 10.26089/NumMet.v26r428

6. Макаров В.Ф., Песин М.В., Коногорова Л.В. и др. Особенности обрабатываемости новых высокопрочных титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой // Научно-исследовательские технологии в машиностроении. 2024. № 7(157). С. 15–23. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-15-23
7. Wu C.T., Hu W., Chen J.S. A meshfree-enriched finite element method for compressible and nearly incompressible elasticity // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2012. Vol. 90. No. 7, pp. 882–914. DOI: 10.1002/nme.3349
8. Wu C.T., Koishi M. Three-dimensional meshfree enriched finite element formulation for the micromechanical modeling of particulate rubber composites // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2012. Vol. 91. No. 11, pp. 1137–1157. DOI: 10.1002/nme.4306
9. Chen J.S., Yoon S., Wang H.P., et al. An improved reproducing kernel particle method for nearly incompressible finite elasticity // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000. Vol. 181. No. 1-3, pp. 117–145. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00067-5
10. Liu W.K., Ong J.S.J., Uras R.A. Finite-element stabilization matrices – a unification approach // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1985. Vol. 53. No. 1, pp. 13–46. DOI: 10.1016/0045-7825(85)90074-x
11. Liu G.R., Zhang G.Y., Wang Y.Y., et al. A nodal integration technique for meshfree radial point interpolation method (NI-RPIM) // International Journal of Solids and Structures. 2007. Vol. 44. No. 11–12, pp. 3840–3860. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.10.025
12. Wu C.T., Biu T.Q., Wu Y.C., et al. Numerical and experimental validation of a particle Galerkin method for metal grinding simulation // Computational Mechanics. 2018. Vol. 61. No. 3, pp. 365–383. DOI: 10.1007/s00466-017-1456-6
13. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // 7th International Symposium on Ballistics (19–21 April 1983; Hague, Netherlands). pp. 541–547.
14. Olleak A.A., El-Hofy H.A. Prediction of cutting forces in high speed machining of Ti6Al4V using SPH method // ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (08–12 June 2015; Charlotte, North Carolina, USA). Vol. 1. V001T02A018. DOI: 10.1115/MSEC2015-9201
15. Joshi S. Dimensional inequalities in chip segments of titanium alloys // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2018. Vol. 21. No. 2, pp. 238–244. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.03.006
16. Lampropoulos A.D., Markopoulos A.P., Manolacos D.E. Modeling of Ti6Al4V alloy orthogonal cutting with smooth particle hydrodynamics: a parametric analysis on formulation and particle density // Metals. 2019. Vol. 9. No. 4: 388. DOI: 10.3390/MET9040388

17. Guo Y.B., Yen D.W. A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 155–156. No. 1, pp. 1350–1356. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.210
18. Limido J., Espinosa C., Salaün M., et al. SPH method applied to high speed cutting modelling // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2007. Vol. 49. No. 7, pp. 898–908. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2006.11.005
19. Aydin M. Numerical study of chip formation and cutting force in high-speed machining of Ti-6Al-4V based on finite element modeling with ductile fracture criterion // *International Journal of Material Forming*. 2021. Vol. 14. No. 5, pp. 1005–1018. DOI: 10.1007/s12289-021-01617-9
20. Childs T.H.C. Material property needs in modelling metal machining // 5th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (EURODYMAT 1997; 22–26 September 1997; Toledo, Spain). Vol. 07. No. C3, pp. C3-XXI-C3-XXXVI. DOI: 10.1051/jp4:1997301

References

1. Grigor'ev SN, Volosova MA, Migranov MS, et al. Nano-structured wear-resistant coatings effectiveness at titanium alloys high-speed milling. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):188-195. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-188-195
2. Dmitrieva MO, Mel'nikov AA, Nosova EA, et al. Studying the VT16 titanium alloy microstructure forming while compressor impeller manufacturing of the small-sized gas turbine engine by additive technologies methods. *Aerospace MAI Journal*. 2023;30(2):196-203. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
3. Kukudzhyanov VN, Levitin AL. Numerical modeling of cutting processes for elastoplastic materials in 3D-statement. *Mechanics of Solids. A Journal of RAS*. 2008;43(3):494-501. (In Russ.). DOI: 10.3103/S0025654408030205
4. Belov AN. The investigation of shaving forming process during BT8 titanium alloy shaping. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2013;21(3):120–123. (In Russ.). DOI: 10.14498/tech.2013.3.%25u
5. Rublev GD. Modified axisymmetric contact smoothed particle hydrodynamics method with the possibility of modeling surface tension. *Numerical Methods and Programming*. 2025;26(4):422–437. (In Russ.). DOI: 10.26089/NumMet.v26r428
6. Makaruv VF, Pesin MV, Konogorova LV, et al. Cutting ability features for new high-strength titanium alloys with an ultrafine-grained structure used for aircraft parts. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2024(7):15–23. (In Russ.). DOI: 10.30987/2223-4608-2024-15-23
7. Wu CT, Hu W, Chen JS. A meshfree-enriched finite element method for compressible and nearly incompressible elasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2012;90(7):882–914. DOI: 10.1002/nme.3349
8. Wu CT, Koishi M. Three-dimensional meshfree enriched finite element formulation for the micromechanical modeling of particulate rubber composites. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2012;91(11):1137–1157. DOI: 10.1002/nme.4306
9. Chen JS, Yoon S, Wang HP, et al. An improved reproducing kernel particle method for nearly incompressible finite elasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000;181(1-3):117–145. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00067-5
10. Liu WK, Ong JSJ, Uras RA. Finite-element stabilization matrices – a unification approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1985;53(1):13–46. DOI: 10.1016/0045-7825(85)90074-x
11. Liu GR, Zhang GY, Wang YY, et al. A nodal integration technique for meshfree radial point interpolation method (NI-RPIM). *International Journal of Solids and Structures*. 2007;44(11–12):3840–3860. DOI: 10.1016/j.ijlsolstr.2006.10.025
12. Wu CT, Biu TQ, Wu YC, et al. Numerical and experimental validation of a particle Galerkin method for metal grinding simulation. *Computational Mechanics*. 2018;61(3):365–383. DOI: 10.1007/s00466-017-1456-6
13. Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *7th International Symposium on Ballistics (April 19–21, 1983; Hague, Netherlands)*. p. 541–547.
14. Olleak AA, El-Hofy HA. Prediction of cutting forces in high speed machining of Ti6Al4V using SPH method. *ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (June 08–12, 2015; Charlotte, North Carolina, USA)*. Vol. 1. V001T02A018. DOI: 10.1115/MSEC2015-9201
15. Joshi S. Dimensional inequalities in chip segments of titanium alloys. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018;21(2):238–244. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.03.006
16. Lampropoulos AD, Markopoulos AP, Manolagos DE. Modeling of Ti6Al4V alloy orthogonal cutting with smooth particle hydrodynamics: a parametric analysis on formulation and particle density. *Metals*. 2019;9(4):388. DOI: 10.3390/MET9040388
17. Guo YB, Yen DW. A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;155–156(1):1350–1356. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.210
18. Limido J, Espinosa C, Salaün M, et al. SPH method applied to high speed cutting modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2007;49(7):898–908. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2006.11.005

19. Aydın M. Numerical study of chip formation and cutting force in high-speed machining of Ti-6Al-4V based on finite element modeling with ductile fracture criterion. *International Journal of Material Forming*. 2021;14(5):1005–1018. DOI: 10.1007/s12289-021-01617-9
20. Childs THC. Material property needs in modelling metal machining. *5th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (EURODYMAT 1997; September 22-26, 1997; Toledo, Spain)*. 1997;07(C3):XXI-XXXVI. DOI: 10.1051/jp4:1997301

Статья поступила в редакцию / Received 29.01.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 09.02.2026
Принята к публикации / Accepted 11.02.2026