ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2026 • ФИЗИКА • Вып. 3

Избранные доклады Всероссийской конференции «Механика в новых материалах, конструкциях, технологиях», посвящённой 100-летию А. Н. Поздеева 25–27 марта 2026 г., ИМСС УрО РАН, г. Пермь

УДК 539.5
PACS 62.20.−x, 62.20.Fe, 68.35.Ct

Многоуровневое моделирование формирования шероховатости на поверхности кристаллита сплава Inconel 718

П. А. Гладких†, Я. В. Вяткин‡, К. А. Романов, Н. С. Кондратьев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
† pagladkikh@pstu.ru
‡ javvjatkin@pstu.ru

Надёжность и долговечность ответственных деталей и конструкций определяется качеством поверхности, получаемой после технологических процессов обработки изделий из металлов и сплавов. Одним из наиболее важных параметров, характеризующих состояние поверхности после обработки, является шероховатость, которая формируется в материалах при пластической деформации и напрямую влияет на эксплуатационные характеристики готового изделия. Детали с высоким значением параметра шероховатости имеют низкое значение запаса усталостной прочности, сопротивляемости коррозии, предельных деформаций, а также повышенные значения характеристик контактного трения. В силу этого для снижения шероховатости поверхности в изделиях востребованной является задача определения и понимания физических механизмов её образования в металлах и сплавах, используемых в актуальных областях промышленности, в частности, авиастроительной. В настоящей работе с использованием прямой многоуровневой конститутивной модели с явным учетом субзёренной структуры описан процесс образования шероховатости на свободной границе кристаллита жаропрочного никелевого сплава Inconel 718. Проведено моделирование процесса изгиба, в результате которого была определена шероховатость на его свободной границе при различных базовых ориентациях кристаллита. Получены и проанализированы результаты моделирования, позволяющие оценить влияние ориентации кристаллита на формирование шероховатости и выявить ключевые физические механизмы данного процесса.

Ключевые слова: шероховатость поверхности; многоуровневые конститутивные модели; кристаллит; изгиб; сплав Inconel 718

Поступила в редакцию 01.06.2026; после рецензии 22.06.2026; принята к опубликованию 22.06.2026

Multilevel modeling of surface roughness formation on an Inconel 718 alloy crystallite

P. A. Gladkikh†, I. V. Viatkin‡, K. A. Romanov, N. S. Kondratev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
† pagladkikh@pstu.ru
‡ javvjatkin@pstu.ru

The reliability and durability of critical components and structures are determined by the surface quality achieved through the machining of metal and alloy products. One of the most important parameters characterizing the surface condition after machining is surface roughness, which is formed in materials during plastic deformation and directly affects the operational characteristics of the finished product. Components with high surface roughness values have low fatigue strength, corrosion resistance, and yield strength, as well as higher values of contact friction characteristics. Therefore, to reduce surface roughness in products, it is necessary to identify and understand the physical

© Гладких П. А., Вяткин Я. В., Романов К. А., Кондратьев Н. С., 2026

распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

mechanisms of its formation in metals and alloys used in relevant industrial sectors, particularly in the aerospace industry. In this paper, using a direct multilevel constitutive model that explicitly accounts for the subgrain structure, we describe the process of roughness formation at the free boundary of a crystallite of the heat-resistant nickel alloy Inconel 718. The bending process was simulated, and the roughness at the free boundary was determined for various basal orientations of the crystallite. The simulation results were used to assess the influence of the crystallite orientation on the formation of roughness and to identify key physical mechanisms involved in this process.

Keywords: surface roughness; multilevel constitutive models; crystallite; bending; Inconel 718 alloy

Received 01 June 2026; revised 22 June 2026; accepted 22 June 2026

doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-5-14

1. Введение

Технологические процессы механической обработки, такие как точение, фрезерование и шлифование, а также методы обработки металлов давлением, определяют не только конечную форму изделия, но и качество поверхностного слоя детали, от которого зависят многие механические свойства. В ходе механической обработки материал подвергается интенсивным термомеханическим воздействиям, что приводит к изменению его микроструктуры и, как следствие, формированию специфической поверхности [1, 2]. Качество обработанной поверхности, в первую очередь её шероховатость и поле остаточных напряжений, напрямую влияет на эксплуатационные характеристики изделий: усталостную долговечность [3–5], износостойкость сопрягаемых поверхностей [6, 7] и коррозионную стойкость [8]. В связи с этим прогнозирование и моделирование процессов формирования шероховатости приобретает высокую практическую значимость. Особую актуальность данная задача имеет при обработке жаропрочных никелевых сплавов, которые являются ключевыми конструкционными материалами в авиастроении, ракетно-космической технике и энергетике [9, 10]. Из таких сплавов изготавливают рабочие и направляющие лопатки газовых турбин, диски компрессоров, камеры сгорания и элементы реактивных двигателей, работающие в условиях высоких температур и агрессивных сред [7, 11].

Традиционные эмпирические зависимости и макрофеноменологические модели [12, 13] часто не способны учесть влияние микроструктурной неоднородности на кинематику в процессе механической обработки, что снижает предсказательную способность и точность прогнозирования итогового состояния поверхности. Для преодоления указанных ограничений в современной вычислительной механике и материаловедении активно развиваются многоуровневые конститутивные модели (КМ) , основанные на физических теориях пластичности [14, 15]. В зависимости от гипотезы связи характеристик на соседних уровнях многоуровневые модели подразделяются на три основных класса: прямые, реализуемые обычно с применением метода конечных элементов (МКЭ) с явным заданием реальной или синтетической микроструктуры [16, 17]; статистические, учитывающие вероятностные распределения свойств зёрен и случайный характер распределения дефектов в них [18, 19] и самосогласованные, основанные на рассмотрении каждого отдельного зерна в матрице с эффективными свойствами [20]. Применение данных моделей обеспечивает корректное описание инструментального воздействия с эволюцией микроструктуры материала, что критически важно для достоверного расчёта шероховатости конструкционных сплавов. Это создаёт теоретическую основу для цифрового проектирования оптимизации режимов механической обработки и гарантированного обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надёжности авиационных и энергетических компонентов. В настоящее время для описания шероховатости, формируемой на свободной поверхности изделия, в основном, применяются прямые модели [21, 22].

Для адекватного описания формирования шероховатости в технологических процессах обработки металлов и сплавов целесообразно провести детальное моделирование поведения части объёма зерна материала с целью исследования реализации физических механизмов, которые влияют на формирование шероховатости на свободной поверхности изделия. Далее для краткости рассматриваемую в настоящей работе часть объёма зерна будем называть «кристаллитом». Для детального описания деформирования кристаллита никелевого сплава Inconel 718 в настоящей работе применяется прямая многоуровневая конститутивная модель с явным учётом субзёренной структуры, ключевым механизмом деформирования в которой является внутризёренное скольжение краевых дислокаций, приводящее к поворотам решётки кристаллита. С использованием численной реализации рассматриваемой КМ описывается процесс формирования шероховатости на свободной поверхности при изгибе кристаллита жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 при различных начальных базовых ориентациях.

В разделе 2 приведена постановка краевой задачи по определению шероховатости на свободной

поверхности кристаллита никелевого сплава Inconel 718 с применением прямой КМ; приведены значения параметров модели, полученные при идентификации. В разделе 3 приведены результаты моделирования и проведен их анализ. В заключении представлены основные выводы по работе.

2. Материалы и методы

Объектом исследования в данной работе является кристаллит жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 с гранецентрированной кубической (ГЦК) решёткой, состоящий из субзёрен с малоугловой разориентацией (<15°) кристаллической решётки между ними. Ориентация каждого субзерна определялась случайным отклонением в диапазоне [0; 22.5]° относительно базовой ориентации решётки кристаллита. В настоящей работе анализируется поведение кристаллита, состоящего из 100 субзёрен (рис. 1). Разбиение объёма кристаллита на субзёрна проводилось в свободно распространяемом программном пакете Neper [23], который выбран как широко используемый инструмент для генерации полиэдрических структур. В его основе лежит построение объёма зёрен или субзёрен с помощью полиэдров Лагерра. Для полученных полиэдрических структур можно построить конечно-элементную сетку, которая затем передаётся в МКЭ-решатель.

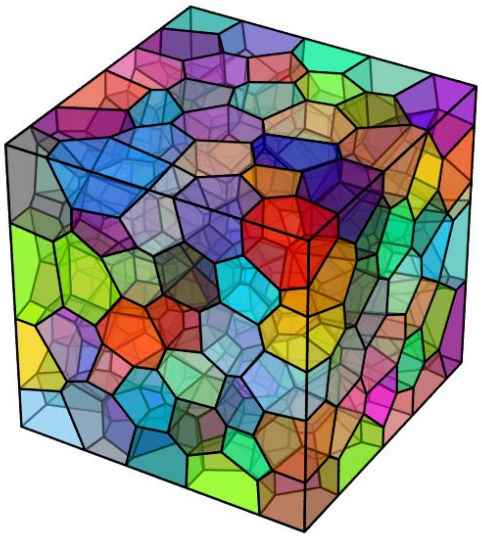


Рис. 1. *Объём кристаллита с разбиением на субзёрна*

Формулировка граничных условий для имитации деформирования кристаллита в стеснённых условиях в объёме зерна является комплексной проблемой. В связи с этим кристаллит погружается в изотропную упругопластическую среду с осреднёнными свойствами никелевого сплава Inconel 718. Характерный размер этой среды на порядок больше рассматриваемого кристаллита. Краевые условия посредством этой среды передают механическое воздействие на часть рассматриваемого зерна (рис. 2).

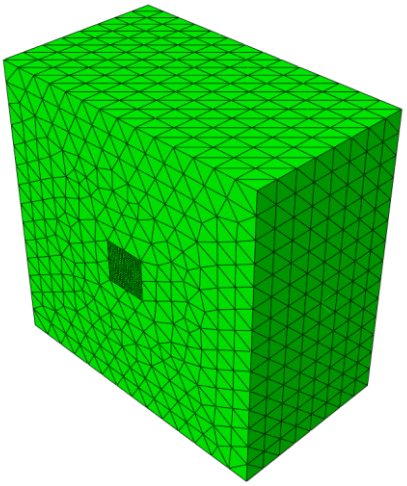


Рис. 2. *Матрица с кристаллитом*

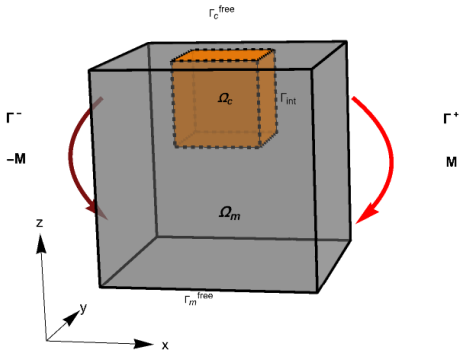


Рис. 3. *Схема нагружения расчётной области деформацией изгиба*

Далее кратко опишем постановку краевой задачи для описания деформирования матрицы с кристаллитом. Пусть $\Omega_m \subset R^3$ – открытая ограниченная область (упругопластическая матрица, имеющая кубическую форму), $\Omega_c \subset R^3$ – область кристаллита. Границы областей имеют следующие обозначения: Γ^+, Γ^- – две противоположные боковые грани, на которых задаются изгибающие моменты; $\Gamma_m^{free}, \Gamma_c^{free}$ – свободные грани матрицы и кристаллита; Γ_{int} – поверхность контакта матрицы и кристаллита, для которой принимается гипотеза идеального контакта границ (равенство векторов напряжений и перемещений на границе раздела). В настоящей работе процесс деформирования матрицы с кристаллитом задаётся нагружением в виде изгиба, при котором поверхностные нагрузки, определяющие момент вращения, присутствуют на гранях Γ^+, Γ^- матрицы. Данные грани принимаются абсолютно жёсткими, вращающимися вокруг выделенной оси при нулевом перемещении вдоль неё. Изгиб задаётся таким образом, чтобы в кристаллите возникала пластическая деформация и выпуклой стороной являлась свободная поверхность. Схема нагружения для изгиба матрицы с кристаллитом приведена на рис. 3.

Краевая задача деформирования матрицы с кристаллитом решалась с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Abaqus, в котором для решения задач механики деформируемого твёрдого тела используется вариационный принцип виртуальной работы с формулировкой в терминах вариации скоростей (вариационный принцип Журдена) [24]. Объём кристаллита разбивался на восьмиузловые конечные элементы с билинейной аппроксимацией. Матрица разбивалась на тетрагональные конечные элементы с линейной аппроксимацией.

Для описания поведения матрицы использовалась встроенная в Abaqus модель теории пластического течения [24]. Параметры модели материала для матрицы сплава Inconel 718 приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Параметры модели материала для матрицы сплава Inconel 718*

Параметр	Значение	Источник
Плотность	ρ = 8193.25 кг/м^3	[25]
Изотропные упругие модули	E = 191.65 ГПа ν = 0.32	Осреднение анизотропных модулей [16]

Эффективные пластические свойства матрицы были оценены путём предварительных численных испытаний модели мезоуровня с явным учётом субзёренной структуры. Для этого проводилось моделирование одноосного растяжения рассматриваемого кристаллита и определялись осреднённые по конечным элементам кривые деформирования, которые в последующих расчётах использовались как пластические свойства матрицы. На рисунке 4 представлена диаграмма зависимости изменения предела текучести от интенсивности деформаций при одноосном растяжении со скоростью деформации 0.001 с$^{-1}$ при комнатной температуре.

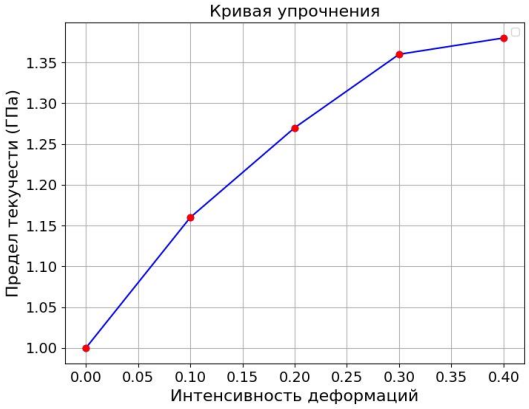


Рис. 4. *Кривая упрочнения для материала матрицы*

Для описания поведения кристаллита никелевого сплава Inconel 718 используется прямая упруго-вязкопластическая модель мезоуровня, уравнения которой записаны в текущей конфигурации и удовлетворяют принципу объективности [16]:

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{cr}} &= \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{n} : \mathbf{z}^{\mathrm{e}},\\
\mathbf{z} &= \hat{\nabla}\mathbf{v}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{\omega},\\
\mathbf{z} &= \mathbf{z}^{\mathrm{e}} + \mathbf{z}^{\mathrm{in}},\\
\boldsymbol{\omega} &= \mathbf{I}\times(\mathbf{k}_3\mathbf{k}_1\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_2\mathbf{k}_1\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_1\mathbf{k}_2\mathbf{k}_3) : \\
&: (\hat{\nabla}\mathbf{v}^{\mathrm{T}} - \mathbf{z}^{\mathrm{in}}),\\
\mathbf{z}^{\mathrm{in}} &= \sum_{v=1}^{V}\dot{\gamma}^{(v)}\mathbf{b}^{(v)}\mathbf{n}^{(v)},\\
\dot{\gamma}^{(v)} &= \dot{\gamma}_0\left(\frac{\tau^{(v)}}{\tau_c^{(v)}}\right)^m H(\tau^{(v)} - \tau_c^{(v)}),\\
\tau^{(v)} &= \mathbf{b}^{(v)}\mathbf{n}^{(v)} : \boldsymbol{\sigma},\\
\dot{\tau}_c^{(v)} &= \sum_{l=1}^{V} h^{(v,l)}\dot{\gamma}^{(l)},\\
h^{(v,l)} &= [q_{lat} + (1-q_{lat})\delta^{(v,l)}]h^{(l)},\\
h^{(l)} &= h_0\left|1 - \frac{\tau_c^{(l)}}{\tau_{sat}}\right|^{\chi},
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений Коши, верхний индекс «cr» обозначает не зависящую от выбора системы отсчёта (коротационную) производную, $\boldsymbol{\omega}$ – спин жёсткой подвижной системы координат (ПСК), $\mathbf{n}$ – тензор упругих свойств кристаллита, $\mathbf{z}, \mathbf{z}^{\mathrm{e}}, \mathbf{z}^{\mathrm{in}}$ – полная мера скорости деформации, её упругая и неупругая составляющие, $\hat{\nabla}\mathbf{v}^{\mathrm{T}}$ – транспонированный градиент скорости, $\hat{\nabla}$ – оператор Гамильтона в текущей конфигурации, $\mathbf{I}$ – единичный тензор, $\mathbf{k}_i$ – i-ый базисный вектор подвижной системы координат, связанный с базисом кристаллографической системы координат, $\dot{\gamma}^{(v)}, \mathbf{b}^{(v)}, \mathbf{n}^{(v)}$ – скорость сдвига, вектор Бюргерса и нормаль системы скольжения v, V – удвоенное число кристаллографических систем скольжения, $\tau^{(v)}, \tau_c^{(v)}$ – сдвиговые напряжения и их критические значения по системе скольжения v, $\dot{\gamma}_0$ – скорость сдвига при достижении касательным напряжением критического значения, m – параметр скоростной чувствительности материала, $H(\cdot)$ – функция Хэвисайда, q_{lat} – параметр латентного упрочнения, $\delta^{(v,l)}$ – дельта Кронекера, τ_{sat} – напряжения насыщения, h_0, χ – параметры в законе упрочнения. Более детальное описание представленной модели приводится в статье [16].

Соотношения КМ (1) были интегрированы в Abaqus для решения краевой задачи моделирования кристаллита с помощью функции VUMAT, которая позволяет реализовывать пользовательские модели материалов [24]. Параметры КМ (1) для кристаллита Inconel 718 приведены в табл. 2.

Таблица 2. *Параметры модели материала (1) для кристаллита сплава Inconel 718*

Параметр	Значение	Источник
Независимые компоненты тензора упругих свойств	$п_{1111}$ = 274.2 ГПа, $п_{1122}$ = 129 ГПа, $п_{1212}$ = 72.6 ГПа	[26]
Референсная скорость сдвига	$\dot{\gamma}_0 = 10^{-3}$ с$^{-1}$	[27]
Параметр скоростной чувствительности	m = 59	[28]
Напряжение насыщения	τ_{sat} = 650 МПа	Идентификация по экспериментальным данным [29]
Параметры закона упрочнения	h_0 = 2.0 ГПа χ = 1	Идентификация по экспериментальным данным [30]
Параметр латентного упрочнения	q_{lat} = 1.4	[27]
Начальные критические напряжения скольжения	τ_{c_0} = 427 МПа	Идентификация по экспериментальным данным [30]

В настоящей работе рассмотрены различные начальные ориентации решётки кристаллита, которые являются базовыми для гранецентрированных кубических материалов [31, 32] (табл. 3). Ориентация кристаллической решётки определяется тремя углами Эйлера (Ф1, Ф2, Ф3) в нотации Бунге, которые задают последовательность поворотов для перехода из лабораторной системы координат в систему координат кристаллита: поворот вокруг оси Z на угол Ф1, затем вокруг новой оси X′ на угол Ф2 и вокруг новой оси Z″ на угол Ф3. При этом ориентации решётки субзёрен в кристаллите задаются как отклонение до 22.5° по каждому из углов Эйлера от соответствующей базовой ориентации кристаллита (рис. 5).

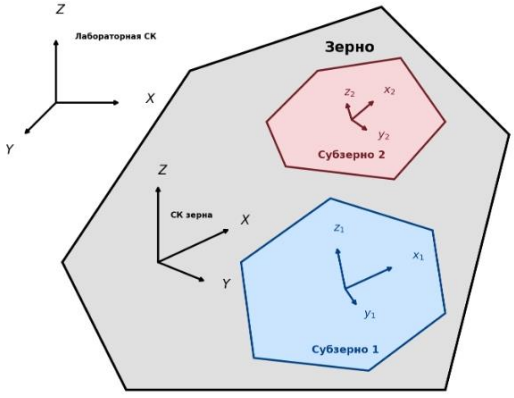


Рис. 5 *Схематичное представление ориентаций кристаллических решёток зерна и субзёрен*

Таблица 3. *Базовые ориентации для материалов с ГЦК решёткой, заданные через углы Эйлера в нотации Бунге [31,32]*

Тип ориентации	Ф1	Ф2	Ф3
Cube	0°	0°	0°
Goss	0°	45°	90°
Brass	35.26°	45°	90°
Copper	90°	35.26°	45°
S1	59°	37°	63°

3. Результаты и обсуждение

Для анализа результатов моделирования формирования шероховатости в процессе изгиба упругопластической матрицы с кристаллитом для материала Inconel 718 были получены графики плотности отклонения точек на свободной поверхности для разных ориентаций кристаллита (приведены на рис. 6). Количественной оценкой шероховатости являлось среднее арифметическое высоты S_a определяемое как:

$$S_a = \frac{1}{A}\iint_A \|z(x,y)\|\,dxdy,$$

где A – площадь области измерения, $z(x, y)$ – отклонение высоты поверхности от средней плоскости в точке с координатами (x, y).

По результатам на рис. 6 видно, что наибольшее отклонение от средней плоскости имеют точки в центральной области свободной поверхности кристаллита. На границе кристаллита наблюдаются пониженные значения отклонения точек от средней поверхности, которые вызваны влиянием матрицы на кристаллит.

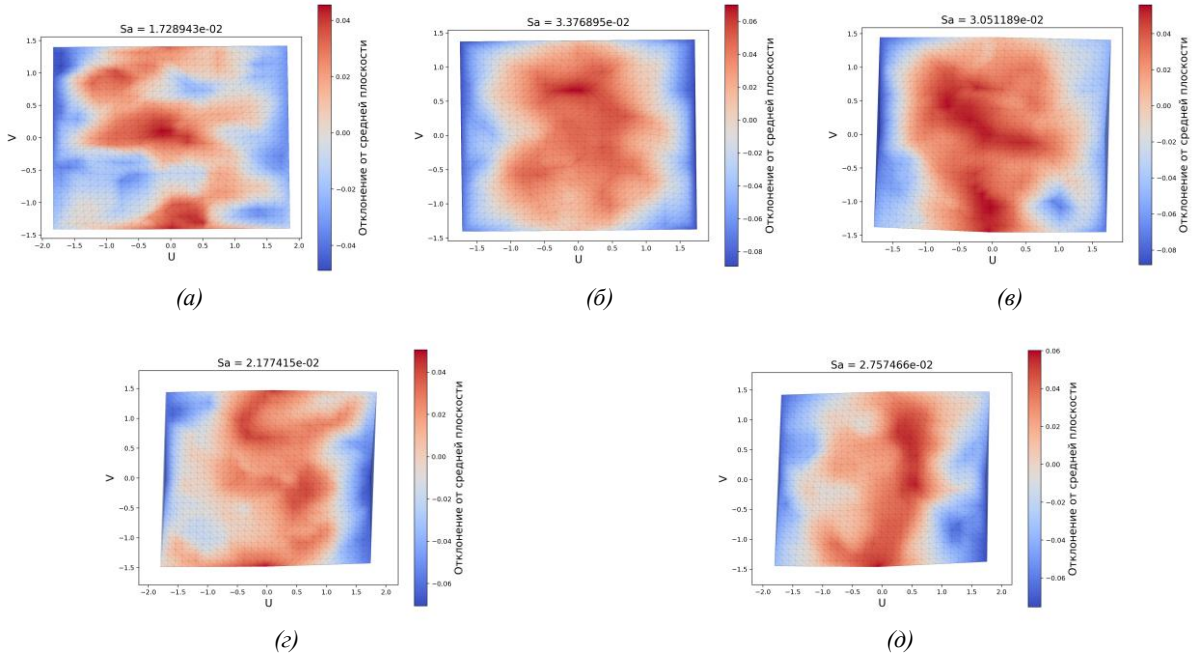
В таблице 4 представлены упорядоченные от меньшего к большему базовые ориентации кристаллита по значению S_a.

Таблица 4. *Значение шероховатости для каждого типа начальной ориентации*

Тип ориентации	Шероховатость (мкм)
Cube	$1.729\cdot10^{-2}$
Copper	$2.177\cdot10^{-2}$
S1	$2.757\cdot10^{-2}$
Brass	$3.051\cdot10^{-2}$
Goss	$3.377\cdot10^{-2}$

Можно заметить, что наибольший показатель шероховатости наблюдается у типов ориентации Goss и Brass. Это связано с тем, что их системы скольжения ориентированы относительно свободной поверхности более «благоприятным» образом для реализации пластических сдвигов.

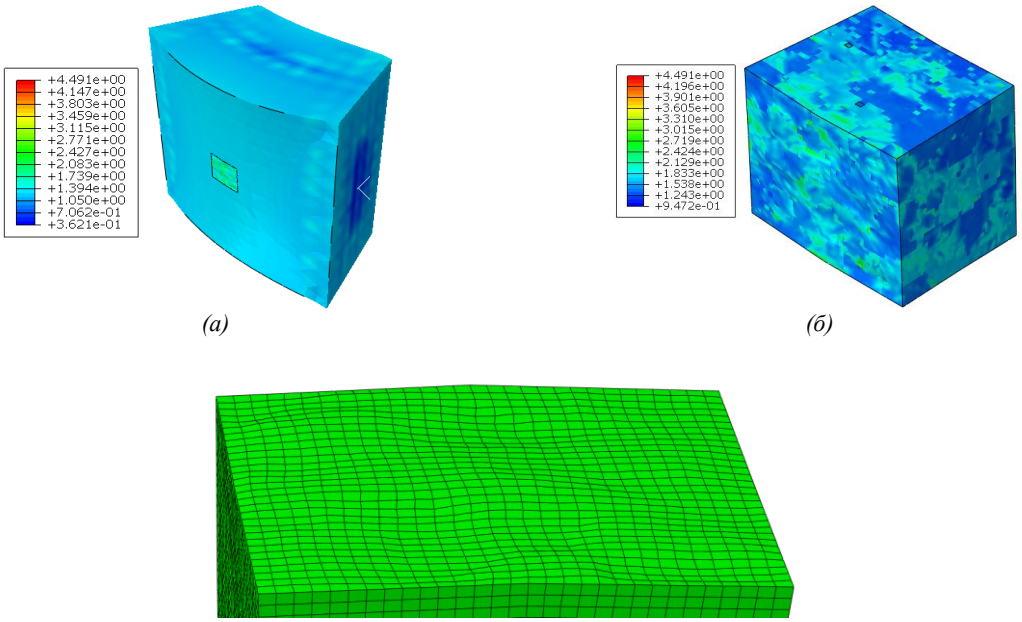
На рисунке 7 представлены поля интенсивности напряжений (по Мизесу) для матрицы с кристаллитом и кристаллит отдельно для ориентации типа Cube.



(а) *(б)* *(в)*

(г) *(д)*

Рис. 6. *Графики плотности отклонения точек свободной поверхности после нагружения изгибом для различных базовых ориентаций: (а) Cube, (б) Goss, (в) Brass, (г) Copper, (д) S1. По осям U и V отложены пространственные координаты точек средней плоскости*



(а) *(б)*

(в)

Рис. 7. *Поля интенсивности напряжений (по Мизесу), [ГПа] в расчётной области для: (а) матрицы с кристаллитом, (б) кристаллита, (в) вид искривлённой свободной поверхности*

Во всех рассмотренных численных экспериментах обе боковые грани матрицы, на которых были заданы моменты вращения, повернулись примерно на угол 17.19°, что привело к ~15% средней интенсивности деформации всей расчётной области. Можно предположить, что при больших значениях угла кривизны кристаллита шероховатости будет более неоднородна распределена по свободной поверхности кристаллита, как это наблюдается в работе [32].

4. Заключение

В работе приведены результаты моделирования формирования шероховатости в кристаллите жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 с применением прямой многоуровневой конститутивной модели, в которой явным образом учитывается субзёренная структура. Для имитации нахождения части зерна в стесненных условиях она была по-

гружена в упругопластическую матрицу с осреднёнными свойствами для сплава Inconel 718. Процессом деформирования матрицы с кристаллитом являлся изгиб, решение краевой задачи для которого было реализовано в коммерческом программном продукте Abaqus с внедренной многоуровневой моделью материала.

По результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

– Выявлена иерархия текстурных компонент по влиянию на шероховатость (от наибольшей к наименьшей) для заданного в работе нагружения изгибом: Goss > Brass > S1 > Copper > Cube;

– Наибольшее отклонение от средней плоскости имеют точки в центральной области свободной поверхности кристаллита.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2026-0007).

Список литературы

1. *Hu G., Lu Y., Zhou Sh. et al.* Experimental study on surface integrity of nickel-based superalloy in ultrasonic elliptical vibration cutting // Micromachines. 2025. Vol. 16, № 7, 728. DOI: 10.3390/mi16070728.
2. *Malakizadi A., Bertolini R., Ducobu F. et al.* Recent advances in modelling and simulation of surface integrity in machining a review // Procedia CIRP. 2022. Vol. 115. P. 232–240. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.079.
3. *Childerhouse T., M'Saoubi R., Franca L. et al.* The influence of machining induced surface integrity and residual stress on the fatigue performance of Ti-6Al-4V following polycrystalline diamond and coated cemented carbide milling // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 163, 107054. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107054.
4. *Lai X., Wang Y., Wang D. et al.* Research on surface integrity and fatigue properties in the turning of TC17 titanium alloy based on the response surface method // Materials. 2023. Vol. 16, № 22, 7180. DOI: 10.3390/ma16227180.
5. *Yin X., Li X., Liu Y. et al.* Surface integrity and fatigue life of Inconel 718 by ultrasonic peening milling // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 22. P. 1392–1409. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.12.019.
6. *Bouhabila H., Bouchoucha A., Merabet A. et al.* Tribological behavior of steel-steel pair: Influence of roughness and cutting parameters // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. 2022. Vol. 16, № 3. P. 9043–9055. DOI: 10.15282/jmes.16.3.2022.07.0716.
7. *Ulutan D., Ozel T.* Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51, № 3. P. 250–280. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.
8. *Wang F., Wang Y., Wang W. et al.* Effect of surface roughness on corrosion resistance of mooring chains for offshore floating photovoltaics // Metals. 2024. Vol. 14, № 10, 1181. DOI: 10.3390/met14101181.
9. *Iqbal M. A., Skotnicová K., Shafiq A. et al.* Inconel alloys: A comprehensive review of properties and advanced manufacturing techniques // International Journal of Thermofluids. 2025. Vol. 29, 101394. DOI: 10.1016/j.ijft.2025.101394.
10. *Kavyassree G., Srimathi S., Abdullah M. K.* Comparative analysis of Inconel 718 and Inconel 625 for rocket nozzles: performance, durability, and manufacturing influence // Acceleron Aerospace Journal. 2025. Vol. 4, № 3. P. 1002–1009. DOI: 10.61359/11.2106-2516.
11. *Ren X., Liu Zh., Liang X., Cui P.* Effects of machined surface integrity on high-temperature low-cycle fatigue life and process parameters optimization of turning superalloy Inconel 718 // Materials. 2021. Vol. 14. № 9, 2428. DOI: 10.3390/ma14092428.
12. *Patil S. S., Gadakh V. S., Shinde V. B. et al.* Grinding process parameter optimization to enhance surface finish using NSGA-II algorithm: an integrated experimental and evolutionary approach // Journal of Engineering and Applied Science. 2026. Vol. 73, № 1, 61. DOI: 10.1186/s44147-026-00907-w.
13. *Wang J., Ye Q., Zhao M., Shi X., Fei T.* Multi-objective parametric optimization for high surface quality and process efficiency in micro-grinding // Measurement and Control. 2021. Vol. 54, № 2, 002029402094495. DOI: 10.1177/0020294020944953.
14. *Baig M., Owusu-Danquah J., Campbell A. A., Duffy S. F.* Review: inelastic constitutive modeling: polycrystalline materials // Materials. 2023. Vol. 16, № 9. DOI: 10.3390/ma16093564.
15. *Трусов П. В., Швейкин А. И.* Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. 605 с.
16. *Вяткин Я., Трусов П.* Прямая физически-ориентированная упруговязкопластическая модель: применение для исследования влияния свободной поверхности на неупругое деформирование монокристаллических образцов // Проблемы прочности и пластичности. 2024. Т. 86. № 4. С. 505–524. DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-4-505-524.
17. *Yang Z., Ngan A. H. W.* A multi-scale crystal-plasticity finite-element framework coupled with efficient and minimalist continuum dislocation dynamics // Modelling and Simulation in Materials

Science and Engineering. 2025. Vol. 33. № 4, 045012. DOI: 10.1088/1361-651X/add7f7.
18. *Trusov P. V., Gladkikh P. A.* Modified elastic-plastic model: implementation algorithm and comparison of computational efficiency with the elastic-viscoplastic model // Fracture and Structural Integrity. 2026. Vol. 20, № 75. P. 463–477. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.75.31.
19. *Yaghoobi M., Allison J. E., Sundararaghavan V.* PRISMS-plasticity TM: an open-source rapid texture evolution analysis pipeline // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2022. Vol. 11, № 4. P. 479–496. DOI: 10.1007/s40192-022-00275-2.
20. *Jeon B., Jeong Y., Tomé C. N.* A critical discussion of elasto-visco-plastic self-consistent (EVPSC) models // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 33. P. 7596–7609. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.11.043.
21. *Korkolis Y. P., Knysh P., Sasaki K. et al.* Deformation-induced surface roughening of an aluminum–magnesium alloy: experimental characterization and crystal plasticity modeling // Materials. 2023. Vol. 16, № 16, 5601. DOI: 10.3390/ma16165601.
22. *Romanova V., Emelianova E., Pisarev M. et al.* Quantification of mesoscale deformation-induced surface roughness in α-titanium // Metals. 2023. Vol. 13, № 2, 440. DOI: 10.3390/met13020440.
23. *Quey R.* Neper: Polycrystal Generation and Meshing [Электронный ресурс]. URL: https://neper.info (Дата обращения: 30.04.2026).
24. Abaqus Finite Element Analysis. SIMULIA. Dassault Systèmes [Электронный ресурс]. URL: https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus (дата обращения: 30.04.2026).
25. *Evans R. M.* The welding and brazing of alloy 718. Defense Metals Information Center Report № 204. Columbus: Battelle Memorial Institute, 1964.
26. *Ghorbanpour S., Zecevic M., Kumar A. et al.* A crystal plasticity model incorporating the effects of precipitates in superalloys: application to tensile, compressive, and cyclic deformation of Inconel 718 // International Journal of Plasticity. 2017. Vol. 99. P. 162–185. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.09.006.
27. Bronkhorst C. A., Kalidindi S. R., Anand L. Polycrystalline plasticity and the evolution of crystallographic texture in FCC metals // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A. 1992. Vol. 341, № 1662. P. 443–477. DOI: 10.1098/rsta.1992.0111.
28. *Cruzado A., Lucarini S, LLorca J. et al.* Crystal plasticity simulation of the effect of grain size on the fatigue behavior of polycrystalline Inconel 718 // International Journal of Fatigue. 2018. Vol. 113. P. 236–245. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.018.
29. *Zainullin R., Mukhtarov Sh. Kh., Shakhov R. et al.* Effect of forging and heat treatment on microstructure and mechanical properties of a PM nickel-based superalloy // Journal of Materials Engineering and Performance. 2026. Vol. 35. P. 26067–26089 DOI: 10.1007/s11665-026-13484-z.
30. *Liu B. B., Zhao R., Liu W., Wan M.* Grain size effect on fracture behavior of the axis-tensile test of Inconel 718 sheet // High Temperature Materials and Processes. 2016. Vol. 35. № 10. P. 989–998. DOI: 10.1515/htmp-2015-0102.
31. *Raabe D., Roters F.* Using texture components in crystal plasticity finite element simulations // International Journal of Plasticity. 2004. Vol. 20. № 3. P. 339–361.
DOI: 10.1016/S0749-6419(03)00092-5.
32. *Rossiter J., Brahme A., Ihal K., Mishra R.* Numerical analyses of surface roughness during bending of FCC single crystals and polycrystals // International Journal of Plasticity. 2013. Vol. 46. P. 82–93. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.01.016.

References

1. Hu G., Lu Y., Zhou Sh. et al. Experimental study on surface integrity of nickel-based superalloy in ultrasonic elliptical vibration cutting. *Micromachines*, 2025, vol. 16, no. 7, 728. DOI: 10.3390/mi16070728.
2. Malakizadi A., Bertolini R., Ducobu F. et al. Recent advances in modelling and simulation of surface integrity in machining a review. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 115, pp. 232–240. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.079.
3. Childerhouse T., M'Saoubi R., Franca L. et al. The influence of machining induced surface integrity and residual stress on the fatigue performance of Ti-6Al-4V following polycrystalline diamond and coated cemented carbide milling. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 163, 107054. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107054.
4. Lai X., Wang Y., Wang D. et al. Research on surface integrity and fatigue properties in the turning of TC17 titanium alloy based on the response surface method. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 22, 7180. DOI: 10.3390/ma16227180.
5. Yin X., Li X., Liu Y. et al. Surface integrity and fatigue life of Inconel 718 by ultrasonic peening milling. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 22, pp. 1392–1409. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.12.019.
6. Bouhabila H., Bouchoucha A., Merabet A. et al. Tribological behavior of steel-steel pair: Influence of roughness and cutting parameters. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 9043–9055.
DOI: 10.15282/jmes.16.3.2022.07.0716.
7. Ulutan D., Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. *International Journal of Machine Tools and Manu-*

facture, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 250–280. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.
8. Wang F., Wang Y., Wang W. et al. Effect of surface roughness on corrosion resistance of mooring chains for offshore floating photovoltaics. *Metals*, 2024, vol. 14, no. 10, 1181. DOI: 10.3390/met14101181.
9. Iqbal M. A., Skotnicová K., Shafiq A. et al. Inconel alloys: A comprehensive review of properties and advanced manufacturing techniques. *International Journal of Thermofluids*, 2025, vol. 29, 101394. DOI: 10.1016/j.ijft.2025.101394.
10. Kavyassree G., Srimathi S., Abdullah M. K. Comparative analysis of Inconel 718 and Inconel 625 for rocket nozzles: performance, durability, and manufacturing influence. *Acceleron Aerospace Journal*, 2025, vol. 4, no. 3, pp. 1002–1009. DOI: 10.61359/11.2106-2516.
11. Ren X., Liu Zh., Liang X., Cui P. Effects of machined surface integrity on high-temperature low-cycle fatigue life and process parameters optimization of turning superalloy Inconel 718. *Materials*, 2021, vol. 14. no. 9, 2428. DOI: 10.3390/ma14092428.
12. Patil S. S., Gadakh V. S., Shinde V. B. et al. Grinding process parameter optimization to enhance surface finish using NSGA-II algorithm: an integrated experimental and evolutionary approach. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2026, vol. 73, no. 1, 61. DOI: 10.1186/s44147-026-00907-w.
13. Wang J., Ye Q., Zhao M., Shi X., Fei T. Multi-objective parametric optimization for high surface quality and process efficiency in micro-grinding. *Measurement and Control*, 2021, vol. 54, no. 2, 002029402094495. DOI: 10.1177/0020294020944953.
14. Baig M., Owusu-Danquah J., Campbell A. A., Duffy S. F. Review: inelastic constitutive modeling: polycrystalline materials. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 9. DOI: 10.3390/ma16093564.
15. Trusov P. V., Shveikin A. I. *Mnogourovnevye modeli mono- i polikristallicheskikh materialov: teoriya, algoritmy, primery primeneniya* [Multilevel models of mono- and polycrystalline materials: theory, algorithms, application examples]. Novosibirsk: Siberian Branch of RAS, 2019. 605 p. (In Russian).
16. Vyatkin Ya., Trusov P. Direct physics-based model of elastoviscoplasticity: Application to the study of free surface effects on inelastic deformation of single crystal samples. *Problems of Strength and Plasticity*, 2024, vol. 86, no. 4, pp. 505–524. DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-4-505-524 (In Russian).
17. Yang Z., Ngan A. H. W. A multi-scale crystal-plasticity finite-element framework coupled with efficient and minimalist continuum dislocation dynamics. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2025, vol. 33. no. 4, 045012. DOI: 10.1088/1361-651X/add7f7.
18. Trusov P. V., Gladkikh P. A. Modified elastic-plastic model: implementation algorithm and comparison of computational efficiency with the elastic-viscoplastic model. *Fracture and Structural Integrity*, 2026, vol. 20, no. 75, pp. 463–477. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.75.31.
19. Yaghoobi M., Allison J. E., Sundararaghavan V. PRISMS-plasticity TM: an open-source rapid texture evolution analysis pipeline. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2022, vol. 11, no. 4, pp. 479–496. DOI: 10.1007/s40192-022-00275-2.
20. Jeon B., Jeong Y., Tomé C. N. A critical discussion of elasto-visco-plastic self-consistent (EVPSC) models. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 33, pp. 7596–7609. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.11.043.
21. Korkolis Y. P., Knysh P., Sasaki K. et al. Deformation-induced surface roughening of an aluminum–magnesium alloy: experimental characterization and crystal plasticity modeling. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 16, 5601. DOI: 10.3390/ma16165601.
22. Romanova V., Emelianova E., Pisarev M. et al. Quantification of mesoscale deformation-induced surface roughness in α-titanium. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 2, 440. DOI: 10.3390/met13020440.
23. Quey R. Neper: Polycrystal Generation and Meshing. URL: https://neper.info (accessed: 30 April 2026).
24. Abaqus Finite Element Analysis. SIMULIA – Dassault Systèmes. URL: https://www.3ds.com /products/simulia/abaqus (accessed: 30 April 2026).
25. Evans R. M. *The welding and brazing of alloy 718*. Report 204. Defense Metals Information Center. Columbus: Battelle Memorial Institute, 1964.
26. Ghorbanpour S., Zecevic M., Kumar A. et al. A crystal plasticity model incorporating the effects of precipitates in superalloys: application to tensile, compressive, and cyclic deformation of Inconel 718. *International Journal of Plasticity*. 2017, vol. 99, pp. 162–185. DOI: 10.1016/j.ijplas.2017.09.006.
27. Bronkhorst C. A., Kalidindi S. R., Anand L. Polycrystalline plasticity and the evolution of crystallographic texture in FCC metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 1992, vol. 341, no. 1662, pp. 443–477. DOI: 10.1098/rsta.1992.0111.
28. Cruzado A., Lucarini S, LLorca J. et al. Crystal plasticity simulation of the effect of grain size on the fatigue behavior of polycrystalline Inconel 718. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 113, pp. 236–245. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.018.

29. Zainullin R., Mukhtarov Sh. Kh., Shakhov R. et al. Effect of forging and heat treatment on microstructure and mechanical properties of a PM nickel-based superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2026, vol. 35, pp. 26067–26089. DOI: 10.1007/s11665-026-13484-z.
30. Liu B. B., Zhao R., Liu W., Wan M. Grain size effect on fracture behavior of the axis-tensile test of Inconel 718 sheet. *High Temperature Materials and Processes*, 2016, vol. 35. no. 10, pp. 989–998. DOI: 10.1515/htmp-2015-0102.
31. Raabe D., Roters F. Using texture components in crystal plasticity finite element simulations. *International Journal of Plasticity*, 2004, vol. 20, no. 3, pp. 339–361. DOI: 10.1016/S0749-6419(03)00092-5.
32. Rossiter J., Brahme A., Ihal K., Mishra R. Numerical analyses of surface roughness during bending of FCC single crystals and polycrystals. *International Journal of Plasticity*, 2013, vol. 46, pp. 82–93. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.01.016.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Гладких П. А., Вяткин Я. В., Романов К. А., Кондратьев Н. С. Многоуровневое моделирование формирования шероховатости на поверхности кристаллита сплава Inconel 718 // Вестник Пермского университета. Физика. 2026. № 3. С. 5–14. doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-5-14

Please cite this article in English as:
Gladkikh P. A., Viatkin I. V., Romanov K. A., Kondratev N. S. Multilevel modeling of surface roughness formation on an Inconel 718 alloy crystallite. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 3, pp. 5–14. doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-5-14

Сведения об авторах
1. *Павел Андреевич Гладких*, м.н.с лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, 614990
2. *Яков Витальевич Вяткин*, м.н.с кафедры математического моделирования систем и процессов ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, 614990
3. *Кирилл Андреевич Романов*, канд. физ.-мат. наук, с.н.с лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, 614990
4. *Никита Сергеевич Кондратьев*, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, 614990

Author information
1. *Pavel A. Gladkikh*, Junior Researcher, Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia
2. *Iakov V. Viatkin*, Junior Researcher, Department of Mathematical Modeling of Systems and Processes, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia
3. *Kirill A. Romanov*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia
4. *Nikita S. Kondratev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russia