

Павленко Д. В.

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорожская политехника», ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ СПЛАВА VT8 В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Цель работы. Установить закономерности влияния режимных параметров резания на тепловое состояние зоны резания заготовок из титанового сплава VT8 в различных структурных состояниях.

Методы исследования. Метод конечных элементов, планирования эксперимента, дисперсионный, корреляционный и регрессионный методы анализа.

Полученные результаты. С использованием разработанной конечно-элементной модели резания заготовок из титановых сплавов в специализированном инженерном программном комплексе DEFORM, выполнено моделирование теплового состояния зоны резания заготовок из титанового сплава VT8 в крупнокристаллическом и субмикрокристаллическом состояниях. Установлены зависимости температуры в зоне резания обрабатываемой заготовки от скорости и глубины резания с учетом изменения физических, механических и теплофизических характеристик сплава. Установлены закономерности распределения температуры в поверхностном слое обрабатываемой заготовки вблизи зоны резания. Показано, что для титанового сплава VT8 в субмикрокристаллическом состоянии максимальная температура в зоне резания в среднем на 40...70 °C выше в сравнении с аналогичными режимами резанием сплава в крупнокристаллическом состоянии. С увеличением скорости и глубины резания различия между температурами уменьшаются. Полученные результаты могут быть использованы при определении рациональных параметров обработки деталей резанием из титанового сплава VT8 с субмикрокристаллической структурой по критерию обеспечения сохранения структурного состояния поверхностного слоя.

Научная новизна. Установлены закономерности изменения теплового состояния зоны резания титанового сплава VT8 в различных кристаллических состояниях с учетом температурной зависимости их физических, механических и теплофизических характеристик.

Практическая ценность. Установленные зависимости могут быть использованы для прогнозирования роста зерен в поверхностном слое деталей из титанового сплава VT8 в крупнокристаллическом и субмикрокристаллическом состояниях, что позволит, с учетом особенностей рекристаллизации зерен в зависимости от структурного состояния, назначить рациональные режимы резания.

Ключевые слова: титановый сплав; крупнокристаллическое состояние; интенсивная пластическая деформация; субмикрокристаллическое состояние; планирование эксперимента; моделирование; метод конечных элементов; скорость резания; глубина резания; поверхностный слой; температура.

1 ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития технологий получения полуфабрикатов сложнолегированных титановых сплавов является порошковая металлургия в сочетании с методами обработки давлением. Результаты исследований показывают, что интеграция методов порошковой металлургии и интенсивной пластической деформации (ИПД), является эффективным мероприятием получения деформированных титановых сплавов с высоким уровнем свойств. Основной эффект при этом достигается за счет устранения пористости, гомогенизации химического состава сплава и формирования в нем субмикрокристаллической (СМК) структуры [1].

В отличие от традиционных методов порошковой металлургии, деформированные полуфабрикаты в СМК состоянии, получаемые с использованием методов ИПД, требуют дальнейшей термической обработки, обработки давлением и резанием. Также, окончательно формообразованные из них поверхности деталей газотурбинных двигателей (ГТД), например аэродинамические поверхности пера лопаток компрессора – спинка и корыто, на заключительном этапе технологического процесса подвергаются упрочняющей обработке [2]. Залогом сохранения высокого уровня свойств является сохранение СМК структуры на всех этапах технологического процесса прежде всего в тонком поверхностном слое детали.

Основными факторами, способствующими

протеканию процессов рекристаллизации и, как следствие, росту зерен в поверхностном слое в процессе механической обработки, являются воздействие температуры и деформация. В исследованиях, посвящённых решению задачи сохранения СМК структуры, показано, что температура резания является важнейшей характеристикой процесса механической обработки. Высокая температура в зоне резания может приводить к росту размера зерна, и, как следствие, снижению физических и механических свойств материала, сформированных в результате ИПД [3]. Действие силового фактора на всех этапах технологического процесса также может приводить к перенаклепу поверхностного слоя и его разрушению.

Таким образом, успешное внедрение новых технологий получения полуфабрикатов титановых сплавов с высоким уровнем механических свойств невозможно без оценки воздействия на обрабатываемую резанием поверхность теплового и силового факторов на чистовых этапах технологического процесса.

Учитывая, что процесс механической обработки может сопровождаться высокими температурами в зоне резания, а обработка лезвийным инструментом является основным методом чистового формообразования поверхностей лопаток ГТД, определяющих их несущую способность, выбор рациональных режимов резания сплавов в СМК состоянии, основанный на оценке теплового состояния зоны резания, является актуальной задачей.

2 АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ РЕЗАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Анализ современного состояния вопроса получения изделий сложной формы из объемных наноматериалов, приведенный в работе [4], показывает, что, учитывая структурную нестабильность сплавов с СМК структурой, наиболее приемлемым к условиям серийного типа производства является формообразование резанием. В свою очередь определение рациональных режимов резания является важным этапом проектирования технологических процессов формообразования сложнопрофильных деталей машин и ГТД в частности. В связи с этим в литературе имеется достаточно большое количество публикаций, связанных с поиском оптимальных режимов и условий резания материалов такого типа. Их авторы, поиск диапазона рациональных режимов резания, связывают с изменениями, происходящими в тонком поверхностном слое под действием силового и теплового факторов [5, 7, 8].

В работе [3] показано, что при обработке металлов резанием возникают источники теплоты как результат превращения механической энер-

гии в тепловую. Распространение теплоты этих источников в обрабатываемом материале, инструменте, стружке и окружающей среде представляет собой сложный физический процесс. Физические явления в процессе резания тесно связаны между собой. Возникая как результат деформации и трения, теплота и температура резания, в свою очередь, оказывают влияние на ход процесса деформации обрабатываемого материала и трения на контактных поверхностях инструмента. В ряде работ отмечается, что температура резания занимает важное место среди других факторов, определяющих шероховатость обработанной поверхности, структурные изменения и физико-механические свойства в поверхностном слое, а также величину и характер залегания поверхностных остаточных напряжений [9].

Несмотря на то, что в настоящее время вопросы теплового состояния зоны резания большинства конструкционных материалов достаточно хорошо изучены, обработка резанием титана и его сплавов в СМК состоянии остается малоисследованной. Известно, что титан значительно уступает по теплопроводности большинству конструкционных материалов. Кроме того, малое отношение относительного удлинения к пределу прочности и приближение предела текучести к пределу прочности свидетельствует о его низкой пластичности. Отмеченные отличия теплофизических и механических свойств титана и сложнолегированных сплавов на его основе являются характерными особенностями этих металлов, влияющими на их обрабатываемость резанием [3, 10]. Изменение комплекса свойств титановых сплавов при формировании в них СМК структуры приводит к возникновению дополнительных, малоизученных в настоящее время, явлений.

Высокая температура при обработке титана обусловлена не только его низкой теплопроводностью, но и особенностями процесса резания. Так, известно, что обработка титановых сплавов сопряжена с незначительной площадью контакта стружки с передней поверхностью инструмента и малой усадкой стружки. В то время как первый фактор приводит к концентрации теплоты на площадках ограниченных размеров, второй – к высокой скорости скольжения стружки по передней поверхности инструмента. Оба фактора способствуют увеличению температуры резания [11].

Исследованию температур и сил при различных условиях резания посвящено большое количество как отечественных, так и зарубежных работ. Имеются достаточно много как экспериментальных исследований теплового состояния зоны резания при различных видах лезвийных обработок титановых сплавов так и исследований, направленных на моделирование процесса резания [12–14].

В последние годы получило развитие направление использования имитационного моделирования для установления основных закономерностей резания. Так, разработаны и успешно применяются программные продукты для моделирования обработки резанием широкого круга материалов методом конечных элементов, такие как ANSYS, DEFORM, ABAQUS, ADVANTAGE, DEFORM machining (cutting) и другие. Имитационное моделирование процесса резания в программном пакете DEFORM в последнее время получило широкое распространение в связи с удачным сочетанием в нем пользовательского интерфейса, высокой надёжности заложенных математических моделей, позволяющих получать адекватные натурным экспериментам результаты [14].

Так, в работах Ступницкого В. В. [13, 14] изучались проблемы создания конечно-элементных моделей, симулирующие рабочие процессы при механической обработке материалов различных классов. Показано, что существующие в системе DEFORM 2D реологические модели резания позволяют адекватно моделировать напряженно-деформированное и тепловое состояние в зоне резания. Установленные в работе [14] закономерности изменения температуры в зоне резания Стали 45 от скорости резания указывают на то, что она может варьироваться в диапазоне 750...1000 °С при изменении скорости резания от 100 до 300 м/мин. Также показано, что изменение глубины резания в диапазоне 0,1...1,3 мм приводит к изменению температуры в зоне резания от 700 до 860 °С, а коэффициента трения в диапазоне 0,2...0,7 к изменению температуры в диапазоне 630...930 °С. В работе [15], на основании результатов исследований теплонапряженности фрезерования сплава ВТ14 методом «естественной термопары» показано, что в процессе обработки резанием возникают контактные температуры, достигающие 700 °С. Наибольшее влияние на нее оказывает скорость резания, меньше влияют глубина фрезерования и подача, при встречном фрезеровании контактные температуры на 10...15% выше, чем при попутном.

Актуальным и дискуссионным на сегодняшний день остается вопрос об эффективности и достоверности имитационного моделирования для решения задач оптимизации условий обработки резанием. Так, в работе [12] показано, что применение двумерной модели резания в системе LS-DYNA, учитывающей большие искажения материала, позволяет адекватно оценивать силу резания при механической обработке. Интерес предлагаемого подхода заключается в том, что он позволяет отказаться от трудоемких натурных экспериментов путем замены их численным моделированием. Эффективность применения числен-

ных методов для моделирования резания показано также в работах [16, 17, 18]. Однако авторы этих и ряда других аналогичных работ исследуют силы в процессе резания, в то время как тепловое состояние зоны резания в зависимости от режимов обработки остается исследованным недостаточно.

Наряду с влиянием режимов и условий резания, в этих и ряде других работ, изучено также влияние физических и механических свойств обрабатываемых материалов на примере моделирования сталей, жаропрочных и титановых сплавов. Показано, что при неизменных условиях резания температура в зоне резания материалов различных классов может отличаться в два и более раза. Можно предположить, что с учетом применения жидких СОТС, вызывающих быстрое охлаждение обработанной поверхности, такие температуры могут приводить к изменению свойств и структуры материала поверхностного слоя. Для титановых сплавов, в различных структурных состояниях, ситуация может усугубляться их плохой обрабатываемостью резанием и отводом тепла из зоны резания.

Несмотря на большое количество выполненных исследований в области моделирования резания различных материалов, в этих работах изучаются преимущественно стали конструкционного назначения, в то время как вопрос исследования титановых сплавов в различном структурном состоянии остается малоизученным. Общей особенностью этих, и ряда других исследований является отсутствие учета изменения физических свойств обрабатываемого материала в различных структурных состояниях на тепловое и напряженно-деформированное состояние обрабатываемой поверхности. Большинство из них направлено на анализ явлений, происходящих в зоне резания материалов с крупнокристаллической структурой.

Исследованию тепловых явлений в зоне резания и особенностей лезвийной обработки сплавов с нано- и субмикроструктурной структурой посвящены работы Симоновой А. А. [3, 19]. В этих и ряде других работ автора показано, что средняя температура резания при обработке крупнокристаллического титана достигает 750...800 К. Также отмечается, что температура в зоне резания при обработке технически чистого титана с субмикроструктурной структурой составляет 850...900 К, что на 15...20% выше, чем при обработке крупнокристаллического титана. Повышение температуры при обработке СМК титана объясняется увеличением его прочности и твердости, что ведет к возрастанию напряжения на условной плоскости сдвига, приводящего к увеличению работы деформирования и тепловыделения. Не-

достатком указанных работ является применение аналитического подхода к оценке теплового состояния зоны резания, а также исследование чистых металлов, которые не находят практического применения в ГТД. Также в этой, и ряде аналогичных работ, моделирование выполнялось без учета изменения теплофизических характеристик сплавов в различных структурных состояниях.

Однако, в работе [20], по результатам исследования термоэлектродвижущей силы титановых сплавов в различных состояниях, показаны результаты, противоречащие утверждению о повышении температуры резания. Авторы утверждают, что термоэлектродвижущая сила у титана в ультрамелкодисперсном состоянии меньше чем у крупнокристаллического, т.е. и температуры в зоне резания должны быть ниже.

Влиянию структуры на обрабатываемость резанием сложнолегированных, жаропрочных титановых сплавов, применяемых в авиадвигателестроении, посвящена работа [21]. Авторы температуру и силы резания в зоне резания исследуемого класса титановых сплавов связывают с изменением микроструктуры в результате легирования водородом, а также типом структуры и размером зерен. Однако, в работе исследованы сплавы с крупнокристаллической и мелкокристаллической структурой. Титановые сплавы с СМК структурой исследованы не были.

Таким образом, анализ публикаций в области резания титановых сплавов в различном структурном состоянии показал, что имеющиеся на сегодняшний день работы не позволяют сделать обобщенные выводы о влиянии структурного состояния и режимов резания титановых сплавов, широко применяемых в конструкции ГТД, на тепловое состояние зоны резания и поверхностного слоя обработанной поверхности.

Цель настоящего исследования — установить факторы и закономерности их влияния на тепловое состояние обработанной поверхности заготовок из титанового сплава ВТ8 в различных структурных состояниях. Для ее достижения были решены задачи, связанные с моделированием напряженно-деформированного состояния и тепловых явлений в зоне резания методом конечных элементов, планированием численных экспериментов, а также математической обработкой их результатов.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Исследования выполняли для сложнолегированного титанового сплава ВТ8 в крупнокристаллическом (КК) и в субмикроструктурном (СМК) состояниях. Исследовали сплав, субмикроструктурная структура в котором была

сформирована методом интенсивной пластической деформации. Данные о теплофизических и механических свойствах сплава в различных структурных состояниях получали по результатам натуральных экспериментов. Использовали модели механических, физических и теплофизических свойств, зависящие от температуры, задаваемые в табличной форме. Механические свойства заготовки моделировали упругопластической моделью материала.

Планирование эксперимента и обработку его результатов, а также расчет коэффициентов парных корреляций, дисперсионный и регрессионный анализ выполняли в программном комплексе STATISTICA. Для построения плана численного эксперимента использовали модуль DOE.

Моделирование тепловых явлений в зоне резания, а также распределение температуры в поверхностном слое выполняли численным методом с использованием программного комплекса DEFORM machining (cutting). Исследование выполняли на двумерной модели для установившегося участка прямоугольного свободного резания (рис. 1а) при котором режущий клин (2) срезает с заготовки (1) слой постоянной толщины t . Приняты допущения об абсолютно жесткой системе СПИД. Расчет выполняли с учетом теплофизических свойств материала режущего инструмента из карбида вольфрама ВК 8, применяемого для обработки титановых сплавов. Инструмент моделировали абсолютно твердым телом. Износ режущего инструмента в процессе обработки не учитывали. Для моделирования стружкообразования использовали модель «эрозии конечных элементов». Использовали модель разрушения Джонсона-Кука.

Граничные условия были реализованы жестким закреплением инструмента (2) и ограничением перемещения заготовки (1). Перемещение задавали заготовке (1) в направлении инструмента (2) с постоянной скоростью. Для создания конечно-элементной модели использовали двумерный четырех-узловой конечный элемент второго порядка. В области контакта заготовки и инструмента (3, 4) выполняли динамическое сгущение сетки в процессе моделирования (рис. 1в), что позволило обеспечить оптимальное количество конечных элементов в зоне резания на всех этапах моделирования.

Учитывая, что в процессе механической обработки заготовок резанию подвергаются как поверхности хвостовика, так и пера лопаток компрессора ГТД (рис. 2а), сечение заготовки соответствовало минимальному из них — максимальной толщине хорды пера (рис. 2б). Это позволило учесть влияние малой толщины пера на температуру обработанной поверхности.

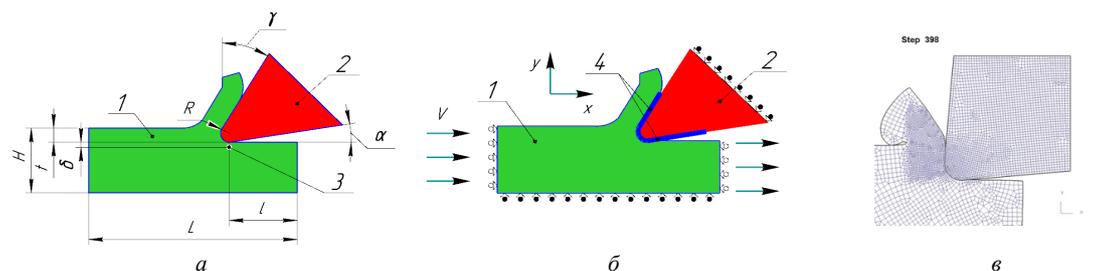


Рисунок 1. Схема моделирования (а), задания граничных условий (б) и конечно-элементная модель (в) зоны резания: 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – режущий клин, 3 – область исследования температуры обработанной поверхности заготовки 4 – зона контакта «инструмент-заготовка»

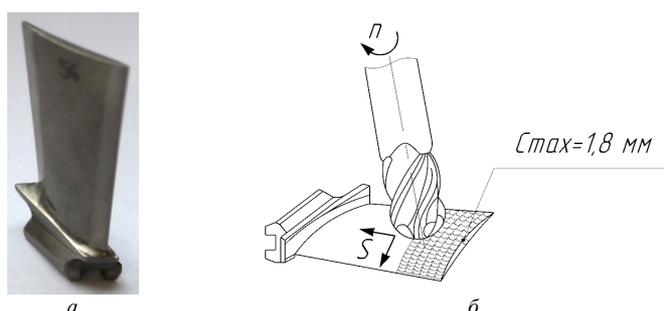


Рисунок 2. Общий вид лопатки компрессора высокого давления ГТД (а) и схема фрезерования пера (б)

Параметры геометрии заготовки при моделировании чистовой обработки пера лопатки компрессора составляли: $H = 2$ мм, $L = 3$ мм, $l = 1,5$ мм, $\delta = 0,1$ мм, что позволило исследовать температуру обработанной поверхности в непосредственной близости от зоны пластической деформации заготовки в процессе движения режущего клина на установившемся этапе резания с учетом особенностей распространения тепла в тонком пере лопатки компрессора ГТД.

Алгоритм распределения тепловых потоков в зоне резания, реализованный при моделировании обработки (рис. 3), позволил выполнять оценку теплового баланса с учетом тепловых потоков от основных источников тепла:

$$Q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4, \quad (1)$$

где q_1 – тепловой поток от внутреннего трения в области пластической деформации металла; q_2 – тепловой поток от трения стружки о переднюю поверхность инструмента; q_3 – тепловой поток от трения обработанной поверхности заготовки о заднюю поверхность инструмента; q_4 – тепловой поток от деформируемой стружки.

Адекватность моделирования теплового состояния оценивали путем сравнения результатов с результатами аналитического расчета и экспериментальными данными. Для оценки теплового состояния использовали метод источников [22]. Также результаты моделирования для сплава ВТ1-0 сравнивали с результатами, полученными в работе.

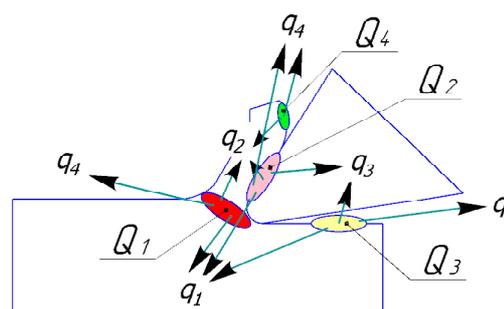


Рисунок 3. Схема расположения источников тепла и тепловых потоков в зоне резания

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Исходными данными для моделирования теплового состояния зоны резания при оценке адекватности определения температуры являлись: материал титан ВТ1-0, предел прочности 650 МПа, условный предел текучести 380 МПа, модуль нормальной упругости 2,05 ГПа, коэффициент температуропроводности 0,049 см²/с, коэффициент теплопроводности 0,0527 кал/см·сек·град, удельная теплоемкость 525 Дж/кг·К, коэффициент термического расширения 10⁻⁶ °С⁻¹, плотность 4540 кг/м³, толщина заготовки 5 мм, обработка на воздухе. Коэффициент черноты принимали равным 0,4, что соответствует обработке титановых сплавов. Режущий инструмент – режущий клин из сплава ВК8, коэффициент теплопроводности 0,13 кал/см·с·град, передний угол 7°, задний угол 1°, главный и вспомогательный углы

45°, радиус при вершине 0,1 мм, коэффициент трения 0,6, коэффициент теплообмена с окружающей средой 22 Вт/м²К. Режимы резания: скорость резания 50 м/мин, глубина резания 0,5 мм.

На основании аналитического расчета для указанных исходных данных установлено, что средняя температура на задней поверхности инструмента составляет 141 °С, на передней поверхности 215°С. На основании анализа температурного поля зоны резания и режущего клина, полученного путем моделирования процесса резания методом конечных элементов для тестовых условий, установлено, что средняя температура на задней поверхности инструмента находится в диапазоне 80...100 °С, на передней поверхности в диапазоне 170...190 °С. Таким образом среднее значение температур в зоне резания различается менее чем на 25...40° С, что составляет порядка 15...25 % от исследуемой величины. Учитывая, что при оценке температуры аналитическим методом принимается ряд допущений и не учитывается зависимость физических, механических, теплофизических характеристик материала от температуры, можно говорить об удовлетворительной адекватности результатов расчета, получаемых численным методом.

Известно, что на тепловое состояние обрабатываемой лезвийным инструментом поверхнос-

ти оказывает влияние большое количество разнообразных факторов. Основными из них являются режимы резания, свойства материала, геометрия инструмента и условия обработки. Учитывая комплексное влияние указанных факторов (табл.1) на тепловое состояние зоны резания, для оценки их значимости и построения моделей влияния каждого отдельного из них, использовали метод планирования эксперимента. В качестве функции отклика (зависимой переменной) использовали максимальную температуру в зоне резания.

Учитывая, что количество факторов (независимых переменных) которые могут влиять на тепловое состояние зоны резания достаточно большое, использовали сверх насыщенный план эксперимента при варьировании факторами на двух уровнях [23]. Для исследуемого сплава в двух структурных состояниях был реализован двухуровневый дробнофакторный эксперимент 2⁽⁵⁻¹⁾ (табл. 2). Применение данного плана эксперимента позволило для 5-ти независимых переменных сократить число опытов до 16-ти, выявить главные эффекты влияния и эффекты парного взаимодействия факторов. Учитывая, что реализация опытов выполнялась численным методом, их дублирование не производили.

Таблица 1. Факторы, влияющие на температурное состояние зоны резания

№ фактора	Название	Диапазон варьирования
1	Скорость резания, м/мин	20...200
2	Глубина резания, мм	0,1...0,5
3	Радиус вершины режущего клина, мм	0,05...0,1
4	Передний угол, град.	2...10
5	Задний угол, град.	0...5
6	Коэффициент трения,	0,6
7	Коэффициент теплообмена, Вт/м ² К	22

Таблица 2. План реализованного эксперимента 2⁽⁵⁻¹⁾

№ п/п	Скорость резания (v), м/мин	Глубина резания (t), мм	Радиус вершины (R), мм	Задний угол (α), град.	Передний угол (γ), град.	Температура в зоне резания (Tmax), °С
1	20 (-1)	0,1 (-1)	0,05 (-1)	5 (+1)	2 (-1)	Y ₁
2	200 (+1)	0,1 (-1)	0,05 (-1)	0 (-1)	2 (-1)	Y ₂
3	20 (-1)	0,5 (+1)	0,05 (-1)	0 (-1)	2 (-1)	Y ₃
4	200 (+1)	0,5 (+1)	0,05 (-1)	5 (+1)	2 (-1)	Y ₄
5	20 (-1)	0,1 (-1)	0,1 (+1)	0 (-1)	2 (-1)	Y ₅
6	200 (+1)	0,1 (-1)	0,1 (+1)	5 (+1)	2 (-1)	Y ₆
7	20 (-1)	0,5 (+1)	0,1 (+1)	5 (+1)	2(-1)	Y ₇
8	200 (+1)	0,5 (+1)	0,1 (+1)	0 (-1)	2 (-1)	Y ₈
9	20 (-1)	0,1 (-1)	0,05 (-1)	0 (-1)	10 (+1)	Y ₉
10	200 (+1)	0,1 (-1)	0,05 (-1)	5 (+1)	10 (+1)	Y ₁₀
11	20 (-1)	0,5 (+1)	0,05 (-1)	5 (+1)	10 (+1)	Y ₁₁
12	200 (+1)	0,5 (+1)	0,05 (-1)	0 (-1)	10 (+1)	Y ₁₂
13	20 (-1)	0,1 (-1)	0,1 (+1)	5(+1)	10 (+1)	Y ₁₃
14	200 (+1)	0,1 (-1)	0,1 (+1)	0 (-1)	10 (+1)	Y ₁₄
15	20 (-1)	0,5(+1)	0,1 (+1)	0 (-1)	10 (+1)	Y ₁₅
16	200 (+1)	0,5(+1)	0,1(+1)	5 (+1)	10 (+1)	Y ₁₆

Для функции отклика строили модель, учитывающую главные, статистически значимые эффекты и эффекты их парного взаимодействия:

$$y = b_0 + \sum_{|i| \leq \infty} b_i x_i + \sum_{|i| < j \leq d} b_{ij} x_i x_j, \quad (2)$$

где i, j – номер независимой переменной.

Для построения моделей использовали факторы, вклад которых являлся статистически значимым. Адекватность модели оценивали по коэффициенту корреляции Пирсона. Также выполняли проверку гипотезы о случайном характере невязок между предсказанными и наблюдаемыми значениями путем построения гистограммы их распределения и сопоставления с кривой нормального распределения. Значимость коэффициента в уравнении регрессии оценивали для уровня доверительной вероятности 95%. Значения функции отклика определяли из полей распределения температуры в поверхностном слое (рис. 4).

Анализ коэффициентов парных корреляций между температурой в различных точках поверхностного слоя обработанной поверхности, близкой к зоне резания показал, что для исследованных сплавов (ВТ1-0 и ВТ8) в крупно и субмикрорекристаллическом состояниях характер распределения температуры идентичен. Коэффициент

корреляции между температурами в различных зонах составлял порядка $R = 0,99$, что свидетельствует о наличии тесной функциональной связи между максимальной температурой в зоне резания и температурами в поверхностном слое независимо от марки сплава и его кристаллического состояния.

Установлено (рис. 5а), что максимальная температура возникает вблизи вершины режущего клина и в стружке, контактирующей с его передней поверхностью. Анализ тепловых полей в поверхностном слое показывает, что действию максимальной температуры подвержено порядка 1% объема заготовки (рис. 5б, в). Уровню теплового воздействия $(0,6 \dots 0,4) T_{\max}$ подвержено порядка 90% объема заготовки. При этом максимальная температура распространяется в поверхностном слое, с учетом пластической деформации в зоне резания, на глубину до 15 мкм, температура на уровне $0,8 T_{\max}$ – на глубину до 60 мкм, $0,6 T_{\max}$ – на глубину до 185 мкм и $0,4 T_{\max}$ – на глубину до 300 мкм. Учитывая, что в процессе резания тепловому воздействию подвергаются последовательно весь поверхностный слой, установленная закономерность может быть использована для оценки величины и времени теплового воздействия на различной глубине поверхностного слоя обрабатываемой поверхности.

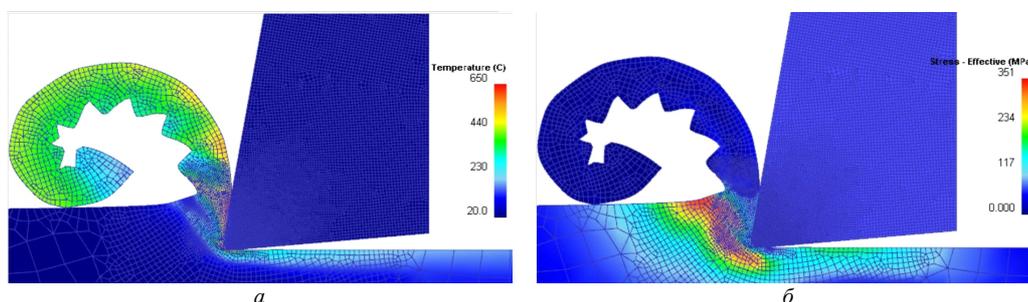


Рисунок 4. Поля распределения температуры (а) и касательных напряжений (б) в зоне резания (сплав ВТ1-0 в крупнокристаллическом состоянии, $v = 200$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $R = 0,1$ мм; $\gamma = 10^\circ$ $\alpha = 5^\circ$)

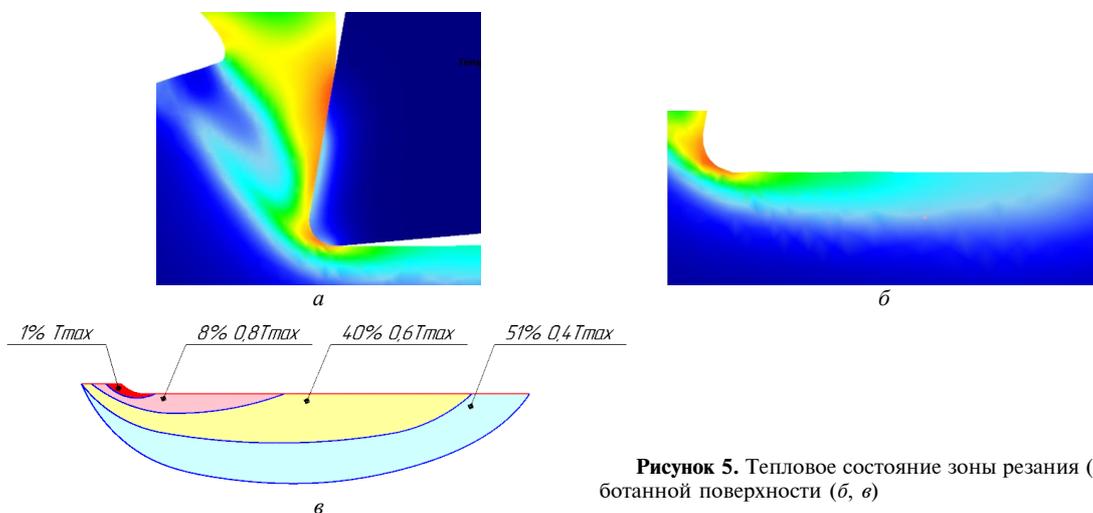


Рисунок 5. Тепловое состояние зоны резания (а), обработанной поверхности (б, в)

Учитывая, что все исследуемые независимые переменные могут оказывать как прямое влияние на тепловое состояние зоны резания, так и косвенное, посредством изменения напряженно-деформированного состояния, механизма схода стружки, трения и ряда других механизмов, проверяли гипотезу об их комплексном влиянии. Вклад главных эффектов и эффектов взаимодействия первого порядка (парные эффекты) изучали методом дисперсионного анализа (табл. 3).

Применение многофакторного дисперсионного анализа позволило исследовать значимость различий в средних значениях и оценить степень влияния каждого отдельного из факторов на максимальную температуру в зоне резания. Анализ расчетных значений дисперсий и их доли от общей дисперсии модели (табл. 3) указывает на то, что для исследуемых сплавов во всех исследованных структурных состояниях наибольшее влияние на температуру в зоне резания оказывает скорость и глубина резания и эффект их парно-

го взаимодействия. Для сплава в крупнокристаллическом состоянии статистически значимым является также эффект взаимодействия скорости резания и радиуса при вершине режущего клина. Результаты дисперсионного анализа указывают на отсутствие статистически значимого влияния на изучаемый параметр геометрических параметров режущего клина.

Незначительное влияние эффектов парного взаимодействия подтверждает правомерность использования линейных моделей. На адекватность полученных моделей указывают графики средних значений для эффектов парных взаимодействий (рис. 6), а также удовлетворительное соответствие невязок моделей закону нормального распределения.

Применение регрессионного анализа позволило установить зависимости максимальной температуры в зоне резания от режимных параметров для сплава в двух структурных состояниях (табл. 4).

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа для моделей максимальной температуры в зоне резания сплава ВТ8 в различных структурных состояниях

Обрабатываемый материал /структурное состояние	Независимые переменные		Эффекты парного взаимодействия независимых переменных		Общая дисперсия модели
	v	t	v ↔ t	v ↔ R	
ВТ8 кк	120235	69038	5513	9950	212105
	56,7	32,5	2,6	4,7	100/96,5
ВТ8 смк	71289	62500	5625	-	151152
	47,2	41,3	5,7		100/94,2

Примечание: в числителе указано значение дисперсии (суммы квадратов, SS), в знаменателе – процент от общей дисперсии модели. КК – крупнокристаллическое состояние; СМК – субмикроструктурное состояние материала.

Таблица 4. Значения статистически значимых коэффициентов в уравнении регрессии $T_{\max} = f(v, t, R)$ и их ошибки (P = 95%)

Обрабатываемый материал	b_0	Независимые переменные		Эффекты парного взаимодействия независимых переменных		Зависимость расчетных значений T_{\max} от наблюдаемых
		v	t	v ↔ t	v ↔ R	
ВТ8 кк	512,4	1,69	441,9	-1,03	-5,57	
	22,54	0,23	52,54	0,44	2,22	
ВТ8 смк	586,3	1,05	427,1	-1,04	-	
	22,25	0,15	61,73	0,43		

Примечание: в числителе указано значение коэффициента, в знаменателе – стандартное отклонение.

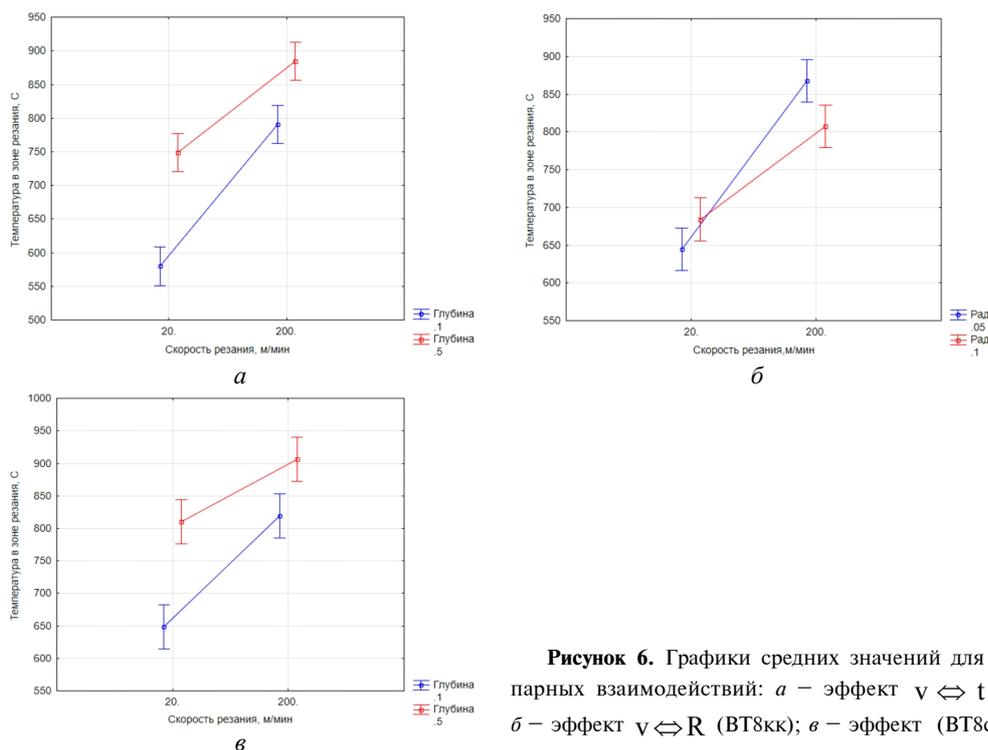


Рисунок 6. Графики средних значений для эффектов парных взаимодействий: *а* – эффект $v \leftrightarrow t$ (ВТ8кк); *б* – эффект $v \leftrightarrow R$ (ВТ8кк); *в* – эффект (ВТ8смк)

Таким образом, регрессионные уравнения для исследованных структурных состояний сплава ВТ8, адекватно описывающие температуру в зоне резания в исследованном диапазоне режимных параметров, имеют вид:

$$T_{\text{ВТ8кк}} = 512,4 + 1,69 \cdot v + 441,9 \cdot t - 1,03 \cdot v \cdot t - 5,57 \cdot v \cdot R, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

$$T_{\text{ВТ8смк}} = 586,3 + 1,05 \cdot v + 427,1 \cdot t - 1,04 \cdot v \cdot t, \quad (4)$$

где v – скорость резания, м/мин; t – глубина резания, мм; R – радиус при вершине режущего клина, мм.

Анализ установленных закономерностей, связывающих температуру резания и режимные параметры показывает, что основная доля изменчивости температуры (89,2% для сплава ВТ8кк и 88,5% для сплава ВТ8смк) может быть объяснена влиянием скорости и глубины резания. Влияние радиуса при вершине режущего клина проявляется только для сплава ВТ8кк в сочетании с влиянием скорости резания (табл. 3). Вероятно, это связано с более высокой пластичностью сплава в крупнокристаллическом состоянии.

Анализ уравнений (3) и (4), а также поверхностностей зависимостей максимальной температуры в зоне резания от глубины и скорости резания (рис. 7а, б) показал, что у сплава ВТ8 в СМК состоянии наблюдается закономерность повышения температуры в зоне резания в среднем на 40...70 °С (при $R = 0,1\text{мм}$; $\gamma = 10^\circ$) в сравнении с аналогичными режимами резанием сплава

в крупнокристаллическом состоянии. С увеличением скорости и глубины резания различие между температурами в зоне резания для сплава в различных структурных состояниях уменьшается (рис. 7в).

Очевидно, что ввиду многообразия механизмов, оказывающих влияние на температуру резания в зависимости от структурного состояния сплава и комплекса его свойств, а также их комплексным влиянием, объяснить повышение температуры при резании сплава СМК состоянием изменением одного из них достаточно сложно. Так, формирование СМК структуры приводит к изменению характеристик прочности и пластичности, теплопроводности и теплоемкости материала, коэффициента термического расширения, вида стружки, коэффициента трения и т.д. Однако, наиболее вероятным и преобладающим механизмом является повышение прочности и твердости сплава в СМК состоянии, что ведет к возрастанию напряжения на условной плоскости сдвига, приводящего к увеличению работы деформирования и, как результат – к тепловыделению.

4 ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таким образом, моделирование теплового состояния зоны резания сплава ВТ8 в различных структурных состояниях позволило установить зависимости температур в зоне резания и ее распределения в поверхностном слое от режимных параметров резания.

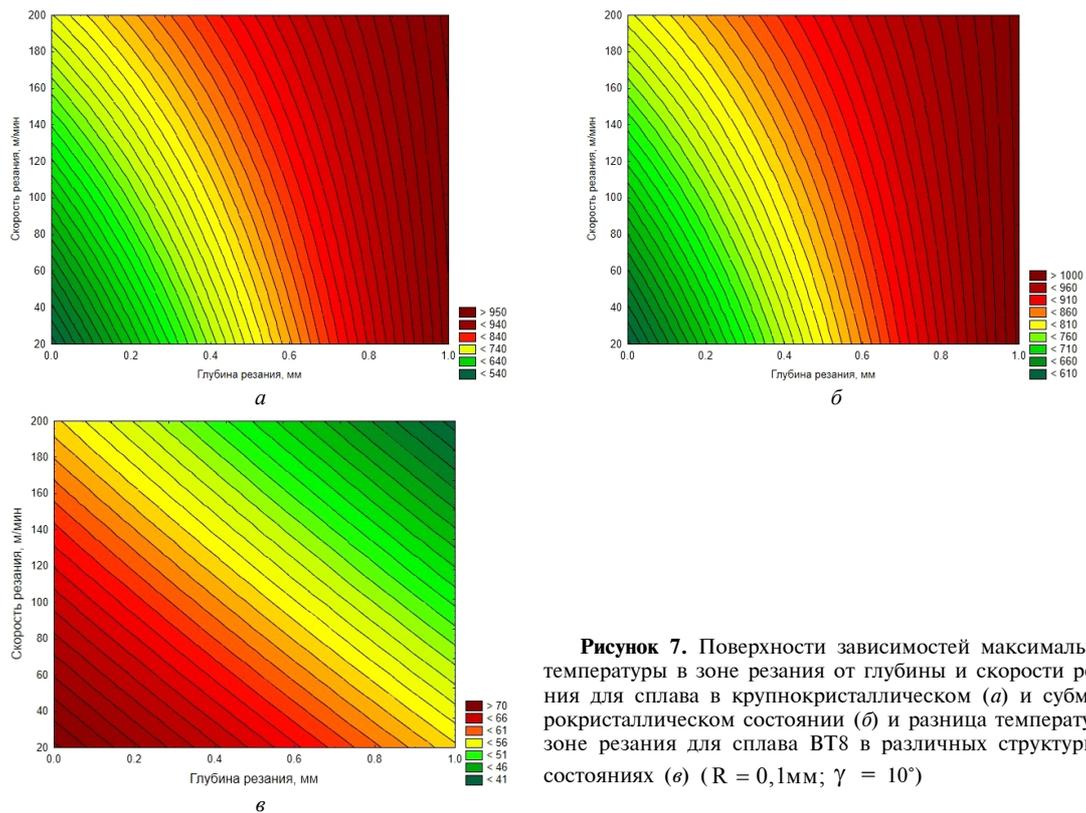


Рисунок 7. Поверхности зависимостей максимальной температуры в зоне резания от глубины и скорости резания для сплава в крупнокристаллическом (*a*) и субмикроструктурном состоянии (*б*) и разницы температур в зоне резания для сплава ВТ8 в различных структурных состояниях (*в*) ($R = 0,1\text{ мм}$; $\gamma = 10^\circ$)

Установлено, что максимальное влияние на температуру резания оказывает скорость и глубина резания независимо от структурного состояния сплава. Для титанового сплава ВТ8 в субмикроструктурном состоянии максимальная температура в зоне резания в среднем на $40\text{...}70^\circ\text{C}$ выше в сравнении с аналогичными режимами резанием сплава в крупнокристаллическом состоянии. С увеличением скорости и глубины резания различие температур резания уменьшается. Установлено, что закономерности распределения температуры в поверхностном слое обрабатываемой поверхности для сплава в крупнокристаллическом и субмикроструктурном состоянии подобны.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимных параметров чистовой лезвийной обработки деталей из сплава ВТ8 в субмикроструктурном состоянии по критерию сохранения структуры материала поверхностного слоя, обеспечивающей высокий уровень прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эффективность винтовой экструзии как метода уплотнения порошковых материалов / Я. Е. Бейгельзимер, Д. В. Павленко, А. С. Сынков, А. А. Давиденко // Порошковая металлургия. — 2019. — № 1/2. — С. 10–18.
2. Технологическое обеспечение эксплуата-

- ционных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др. — Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. — 396 с.
3. Резание металлов с объемной нано- и субмикроструктурной структурой: монография / А. И. Грабченко, Дж. Каптай, А. А. Симонова и др. — Х. : Издательство «Точка», 2012. — 217 с.
4. Сивушкин А. С. Обзор существующих подходов к получению изделий сложной формы из объемных наноматериалов / А. С. Сивушкин, А. А. Кречетов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — № 4. — С. 75–78.
5. Ласточкин Д. А. Совершенствование метода определения рациональных условий формообразования поверхностей на окончательных операциях механической обработки заготовок / Д. А. Ласточкин, Д. Л. Скуратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2006. — №2 (10). — Ч. 1. — С. 197–202.
6. Ким В. А. Влияние пластической деформации при резании металлов на микроструктуру поверхностного слоя / В.А. Ким, Т.А. Отрякина // Ученые записки Комсомольского на Амуре государственного технического университета. — 2010. — № 11-1 (2). — С. 81–87.

7. Скотникова М. А. Структурные превращения в металлах при скоростном резании / М. А. Скотникова, Д. А. Касторский, Т. И. Строкина // Вопросы материаловедения. – 2002. – Вып. 1(29). – С. 199–215.
8. Shear melting and high temperature embrittlement: theory and application to machining titanium / C. Healy, S. Koch, C. Siemers and etc. // Phys Rev Lett. – 2015. – N 114(16). – P. 1–6.
9. Развитие науки о резании металлов / Ф. В. Бобров, Г. И. Грановский, Н. Н. Зорев и др. – М. : Машиностроение, 1967 – 415 с.
10. Богуслаев В.А. Изготовление заготовок деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, И.С. Колтун и др. – г. Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2000. – 290 с.
11. Жучков Н. С. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов / Н. С. Жучков, П. Д. Беспяхотный и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 152 с.
12. Espinosa C. Modeling High Speed Machining with the SPH Method / C. Espinosa, J.L. Lacombe, J. Limido, et al. // 10th International LS-DYNA® Users Conference. – 2008. – P. 9–20.
13. Ступницький В. В. Використання автоматизованого програмного комплексу DEFORM для дослідження температурних та деформаційних параметрів під час різання металів / В. В. Ступницький, Б. Р. Магерус // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2012. – № 246. – С. 145–152.
14. Stupnytskyy V. V. Thermodynamic pattern of the workpiece machining by the rheological imitation modelling in deform-3D system / V. V. Stupnytskyy // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні – 2013. – № 772. – С. 102–114.
15. Жучков Н. С. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов / Н. С. Жучков, П. Д. Беспяхотный, А. Д. Чубаров и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 152 с.
16. Chandrasekaran V. V. Finite Element Simulation of Orthogonal Metal Cutting using LS Dyna V. V. Chandrasekaran // A thesis submitted to the Graduate Faculty of Auburn University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science Auburn, Alabama August 06, 2011. – 104 p.
17. Tamizharasan T. Optimization of Cutting insert geometry using DEFORM-3D: Numerical Simulation and Experimental Validation / T. Tamizharasan, K. Senthil // International Journal of Simulation Modelling. – 2012. – №11/2. – P. 65–76.
18. Криворучко Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого; под общ. ред. В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2012. – 496 с.
19. Surface grain coarsening and surface softening during machining of ultra-fine grained titanium / A.A. Symonova, O.N. Verezub, A.A. Sycheva and etc. // Journal of Mining and Metallurgy. – 2012. – № 48 (3)В. – P. 449–459.
20. Чертовских С. В. Обрабатываемость резанием ультрамелкозернистого титана BT1-0, полученного методом равноканального углового прессования / С. В. Чертовских // Вестник машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 43–46.
21. Влияние структуры на обрабатываемость резанием титановых сплавов / Ю. Б. Егорова, А. А. Ильин, Б. А. Колачев и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 4. – С. 16–21.
22. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
23. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

Статья поступила в редакцию 21.05.2019

Павленко Д. В.

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорожская политехника»,
провідний інженер ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна, e-mail:
dvp1977dvp@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ЗОНИ РІЗАННЯ СПЛАВУ BT8 В РІЗНИХ СТРУКТУРНИХ СТАНАХ

Мета роботи. Встановити закономірності впливу режимних параметрів різання на тепловий стан зони різання заготовок з титанового сплаву BT8 в різних структурних станах.

Методи дослідження. Метод скінченних елементів, планування експерименту, дисперсійний, кореляційний і регресійний методи аналізу.

Отримані результати. З використанням розробленої скінчено-елементної моделі різання заготовок з титанових сплавів у спеціалізованому інженерному програмному комплексі DEFORM, виконане моделювання теплового стану зони різання заготовок з титанового сплаву BT8 у великокристалічному та субмікрокристалічному станах. Встановлені залежності температури в зоні різання заготовки, яку обробляють, від швидкості і глибини різання з урахуванням зміни фізичних, механічних і теплофізичних характеристик сплаву. Встановлені закономірності розподілу температури в поверхневому шарі заготовки поблизу зони різання. Показано, що для титанового сплаву BT8 у субмікрокристалічному стані максимальна температура в зоні різання в середньому на 40...70°C вище у порівнянні з аналогічними режимами різання сплаву у великокристалічному стані. Зі збільшенням швидкості та глибини різання відмінності між температурами зменшуються. Отримані результати можуть бути використані при визначенні раціональних параметрів обробки деталей різанням з титанового сплаву BT8 із субмікрокристалічною структурою за критерієм забезпечення збереження структурного стану поверхневого шару.

Наукова новизна. Встановлені закономірності зміни теплового стану зони різання титанового сплаву BT8 у різних кристалічних станах з урахуванням температурної залежності їх фізичних, механічних і теплофізичних характеристик.

Практична цінність. Встановлені залежності можуть бути використані для прогнозування росту зерен у поверхневому шарі деталей з титанового сплаву BT8 у великокристалічному та субмікрокристалічному станах, що дозволить, з урахуванням особливостей рекристалізації зерен, залежно від структурного стану, призначити раціональні режими різання.

Ключові слова: титановий сплав; великокристалічний стан; інтенсивна пластична деформація; субмікрокристалічний стан; планування експерименту; моделювання; метод скінченних елементів; швидкість різання; глибина різання; поверхневий шар; температура.

Pavlenko D. V.

Ph.D, Associate Professor, Professor of the Aircraft Engines Technologies Department of National University «Zaporizka politeknika», Lead Engineer of State enterprise "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@mail.com

MODELING OF THE HEAT STATE OF THE CUTTING ZONE BT8 ALLOY AT THE DIFFERENT STRUCTURAL CONDITIONS

Purpose. The patterns of the influence of regime parameters on the thermal state of the cutting zone of blanks from titanium alloy BT8 in the various structural conditions must establish.

Methodology. The finite element method, experiment planning, dispersion, correlation and regression analysis methods.

Findings. The finite element model for cutting titanium alloy blanks in a specialized engineering software package DEFORM has developed. The simulation of the thermal state of the cutting zone of blanks from titanium alloy BT8 in the coarse-grained and sub-microcrystalline conditions has performed. The dependences of the temperature in the cutting zone of the processed blank on the speed and depth of cut, taking into account changes in the physical, mechanical and thermophysical characteristics of the alloy, have established. Patterns of temperature distribution in the surface layer of the workpiece in the vicinity of the cutting zone have established. It is shown that for the titanium alloy BT8 in the submicrocrystalline state, the maximum temperature in the cutting zone is on average 40 ... 70 ° C higher in comparison with similar regimes by cutting the alloy in the large-crystalline condition. It has been established that with increasing speed and depth of cut the differences between temperatures decrease. The results will use in determining rational processing parameters of parts by cutting made of titanium alloy BT8 with submicrocrystalline structure according to the criterion of ensuring the preservation of the structural condition of the surface layer.

Scientific novelty. The patterns of changes in the thermal state of the cutting zone of the titanium alloy of the BT8 in various crystal conditions with allowance for the temperature dependence of their physical, mechanical and thermal characteristics have established.

Practical value. The dependencies that have been established can be used to predict grain growth in the surface layer of parts made of titanium alloy BT8 in the crystalline and submicrocrystalline conditions. This will allow, taking into account the peculiarities of grain recrystallization depending on the structural state, to assign rational cutting conditions.

Key words. titanium alloy; crystalline condition; severe plastic deformation; submicrocrystalline condition; experiment planning; modeling; finite element method; cutting speed; depth of cut; surface layer; temperature.

REFERENCES

1. Beigelzimer Ya.E., Pavlenko D.V., Synkov A.S., Davidenko A.A. (2019) Effektivnost vintovoi ekstruzii kak metoda uplotneniya poroshkovykh materialov [Efficiency of the twist extrusion as a method of compaction of powder materials]. *Poroshkova metallurgiya Powder Metallurgy*, 1/2, 10–18. (in Russian)
2. Boguslaev V.A., Muravchenko F.M., Zhemanyuk P.D. (2003) Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detalei GTD. Lopatki kompressora i ventilyatora [Technological support of operational characteristics of parts of the GTE. Compressor and fan blades]. Zaporizhzhia: OAO «Motor Sich» [in Russian]
3. Grabchenko A.I., Dzh. Kaptai, A.A. Simonova (2012) Rezanie metallov s obemnoi nano- i submikrokristallicheskoj strukturoj [Cutting of metals with bulk nano- and submicrocrystalline structure]. Kharkov: «Tochka». (in Russian)
4. Sivushkin A.S., Krechetov A.A. (2013) Obzor sushchestvuyushchikh podkhodov k polucheniyu izdelii slozhnoi formy iz obemnykh nanomaterialov [Review of existing approaches to the production of complex-shaped products from bulk nanomaterials]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta/ Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 4, 75–78. (in Russian)
5. Lastochkin D.A., Skuratov D.L. (2006) Sovershenstvovanie metoda opredeleniya ratsionalnykh uslovii formoobrazovaniya poverkhnostei na okonchatel'nykh operatsiyakh mekhanicheskoi obrabotki zagotovok [Improving the method of determining the rational conditions of forming surfaces on the final machining operations of the workpieces]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta " Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2 (10), 197–202. (in Russian)
6. Kim V.A., Otryaskina T.A. (2010) Vliyanie plasticheskoi deformatsii pri rezanii metallov na mikrostrukturu poverkhnostnogo sloya [The effect of plastic deformation during metal cutting on the microstructure of the surface layer]. *Uchenye zapiski Komsomolskogo na Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Scientific notes of Komsomolsky on the Amur State Technical University*. 11–1 (2), 81–87. (in Russian)
7. Skotnikova M.A., Kastorskii D.A., Strokina T.I. (2002) Strukturnye prevrashcheniya v metallakh pri skorostnom rezanii [Structural transformations in metals during high-speed cutting]. *Voprosy materialovedeniya " Questions of materials science*. 1(29), 199–215. (in Russian)
8. Healy C., Koch S., Siemers C., Mukherji D., Ackland G.J. (2015) Shear melting and high temperature embrittlement: theory and application to machining titanium. *Phys Rev Lett*, 114(16), 1–6. [in English].
9. Bobrov F.V. Granovskii G.I., Zorev N.N. (1967) Razvitee nauki o rezanii metallov [The development of the science of cutting metals]. Moscow : Mashinostroenie. (in Russian)
10. Boguslaev V.A., Dolmatov A.I., Koltun I.S. (2000) Izgotovlenie zagotovok detalei gazoturbinykh dvigatelei iz titanovykh splavov [Producing blanks of parts of gas turbine engines from titanium alloys]. Zaporizhzhia: OAO «Motor Sich». (in Russian)
11. Zhuchkov N.S., Bepakhotnyi P.D. (1989) Povyshenie effektivnosti obrabotki rezaniem zagotovok iz titanovykh splavov [Improving the efficiency of machining titanium alloy blanks]. Moscow : Mashinostroenie. (in Russian)
12. Espinosa C., Lacombe J.L., Limido J. (2008) Modeling High Speed Machining with the SPH Method. 10th International LS-DYNA® Users Conference. (in English)
13. Stupnits'kii V.V., Magerus B.R. (2012) Viktoristannya avtomatizovanogo programnogo kompleksu DEFORM dlya doslidzhennya temperaturnykh ta deformatsiynikh parametriv pid chas rizannya metaliv [Using the automated software system DEFORM to study temperature and deformation parameters during cutting of metals]. *Avtomatizatsiya virobnychikh protsesiv u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni*, 246, 145–152. [in Ukrainian].
14. Stupnytsky V. (2013) Thermodynamic pattern of the workpiece machining by the rheological imitation modelling in DEFORM-3d system. *Visnyk Nacionalnogo universytetu "L'vivska politehnika". Optyimizacija vyrobnychyh procesiv i tehnicnyj kontrol u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*. 772, 102–114. (in English)
15. Zhuchkov N.S., Bepakhotnyi P.D. (1989) Povyshenie effektivnosti obrabotki rezaniem zagotovok iz titanovykh splavov [Improving

- the efficiency of machining titanium alloy blanks]. Moscow : Mashinostroenie. (in Russian)
16. Chandrasekaran V. V. (2011) Finite Element Simulation of Orthogonal Metal Cutting using LS Dyna. A thesis submitted to the Graduate Faculty of Auburn University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science Auburn, Alabama August 06, 104. (in English)
 17. Tamizharasan T., Senthil K. (2012) Optimization of Cutting insert geometry using DEFORM-3D: *Numerical Simulation and Experimental Validation. International Journal of Simulation Modelling*, 11/2, 65–76. (in English)
 18. Kryvoruchko D.V., Zaloga V.A. (2012) Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy [Modeling of cutting processes using finite element method: methodological foundations: monograph]. Sumy: Universitetskaya kniga. (in Russian)
 19. Symonova A.A., Verezub O.N., Sycheva A.A. and etc. (2012) Surface grain coarsening and surface softening during machining of ultra-fine grained titanium. *Journal of Mining and Metallurgy*, 48, (3)B, 449–459. (in English)
 20. Chertovskikh S.V. (2007) Obrabatyvaemost rezaniem ultramelkozernistogo titana VT1-0, poluchennogo metodom ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Machinability by cutting ultrafine-grained titanium VT1-0, obtained by the method of equal-channel angular pressing]. *Vestnik mashinostroeniya. Bulletin of engineering*, 5, 43–46. (in Russian)
 21. Egorova Yu. B., Il'in A. A., Kolachev B. A., Nosov V. K., Mamonov A. M. (2003) Vliyanie struktury na obrabatyvaemost' rezaniem titanovykh splavov [The influence of the structure on the machinability of titanium alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. Metal science and heat treatment of metals*, 4, 16–21. (in Russian)
 22. Reznikov A.N., Reznikov L.A. (1990) Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh [Thermal processes in technological systems]. Moscow : Mashinostroenie. (in Russian)
 23. Spiridonov A.A. (1981) Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow : Mashinostroenie. (in Russian)