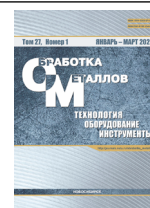




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Фрезерование заготовок из инконеля 625, полученных с помощью электродуговой наплавки





Никита Мартюшев^{1, a, *}, Виктор Козлов^{1, b}, Александр Болтрушевич^{1, c}, Юлия Кузнецова^{2, d},
Александр Бовкун^{3, e}



¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Российская Федерация

² Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>,  kozlov-viktor@bk.ru;

^c  <https://orcid.org/0009-0004-0265-1680>,  aeb20@tpu.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-1388-6125>,  julx@bk.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-0623-4284>,  Bovas87@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.757.048.6:621.791.047.7:669.245

История статьи:

Поступила: 10 декабря 2024

Рецензирование: 30 декабря 2024

Принята к печати: 23 января 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Инконель 625

Электродуговая наплавка (WAAM)

Фрезерование

Силы резания

Режимы резания

Твердость

Износ инструмента

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Аддитивные технологии, в частности печать проволокой, набирают все большую популярность в последнее время. Этот метод позволяет получать заготовки с существенно повышенной твердостью по сравнению с традиционными методами, такими как ковка, что, в свою очередь, значительно увеличивает силу резания при последующей обработке. Настоящее исследование направлено на изучение сил резания при фрезеровании образцов из высокопрочного жаростойкого сплава инконель 625, полученных методом электродуговой наплавки. **Целью работы** является исследование влияния микроструктуры и свойств инконеля 625, полученного методом электродуговой наплавки, на силы резания при фрезеровании. Особое внимание уделено поиску оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимизацию сил резания и вибраций в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь». **Методы исследования.** Образцы изготавливались методом электродуговой наплавки проволоки из жаропрочного никелевого сплава инконель 625. В работе проведен комплексный анализ микроструктуры полученных образцов с использованием современных методов материаловедения. Основное внимание уделено экспериментальному исследованию сил резания при фрезеровании с использованием различных режимов обработки (скорости резания, подачи, глубины резания) и типов фрез. **Результаты и обсуждение.** Микроструктура образцов инконеля 625, полученных электродуговой наплавкой, детально охарактеризована. Определены оптимальные режимы фрезерования, обеспечивающие эффективную обработку материала с учетом его высокой твердости и прочности. Ожидается, что для обработки заготовок из инконеля 625 потребуются высокопрочные твердосплавные фрезы, возможно, специальной геометрии и с повышенной износостойкостью, большего диаметра, чем в случае стали 40X13. Результаты исследования позволят разработать рекомендации по выбору оптимальных режимов резания, минимизирующих силу резания, температуру режущей кромки, износ инструмента и вибрации в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», что повысит производительность и точность обработки.

Для цитирования: Фрезерование заготовок из инконеля 625, полученных с помощью электродуговой наплавки / Н.В. Мартюшев, В.Н. Козлов, А.Е. Болтрушевич, Ю.С. Кузнецова, А.С. Бовкун // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 61–76. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-61-76.

Введение

Современное развитие науки и техники стимулирует активное внедрение инновационных технологий в различных областях, в том числе и в производстве металлических деталей. Аддитивные технологии, несмотря на значительный потенциал, до сих пор сталкиваются с проблемами низкой производительности и высокой стоимости. Стремление к оптимизации этих процес-

*Адрес для переписки

Мартюшев Никита Владимирович, к.т.н., доцент
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
 пр. Ленина, 30,
 634050, г. Томск, Россия
 Тел.: +7 3822 60-62-85, e-mail: martjushev@tpu.ru

сов привело к развитию методов аддитивного производства, основанных на наплавке металлической проволоки [1–3].

Указанный подход в сравнении с использованием порошковых материалов существенно сокращает время изготовления и снижает себестоимость заготовок благодаря более низкой цене проволоки. Однако метод наплавки проволокой часто приводит к недостаточному качеству поверхности, требующей дополнительной механической обработки. Кроме того, специфические условия охлаждения в процессе наплавки приводят к образованию микроструктуры с повышенной твердостью по сравнению с традиционными методами производства, такими какковка или литье. Это особенно актуально при использовании жаропрочных материалов [4, 5]. Для демонстрации преимуществ и недостатков метода наплавки рассмотрим высокопрочный жаростойкий сплав – инконель 625. Его высокая стоимость и специфические свойства позволяют продемонстрировать преимущества и недостатки данного метода. Высокая твердость, достигаемая при наплавке инконеля 625, определяет необходимость применения специализированных методов механической обработки, направленных на оптимизацию процессов и минимизацию затрат [6–8].

В процессе послойной наплавки каждый новый слой наносится на предыдущий, который в свою очередь подвергается повторному нагреву и быстрому охлаждению [9]. Этот цикл нагрева и охлаждения оказывает значительное влияние на формирование микроструктуры. В случае использования мартенситных сталей относительно низкая критическая скорость охлаждения способствует образованию мартенситной структуры с высокой твердостью, что подтверждено исследованиями [10, 11]. Однако при использовании метода селективного лазерного плавления (SLM) или электродуговой наплавки (WAAM) с инконелем ситуация усложняется. Из-за высоких температур плавления и сложных фазовых превращений возникает анизотропия механических свойств готовой детали. Величина зерна, пористость и соответственно прочностные характеристики зависят от направления измерения, как показано в работах [12, 13]. Это связано с неоднородностью термического цикла в процессе послойного наращивания. Работа [14]

демонстрирует анизотропию механических свойств изделий, изготовленных аддитивными методами, а работа [15] указывает на возможность частичной компенсации этого эффекта путем термообработки, что, однако, увеличивает затраты на производство. Кроме того, быстрое охлаждение при SLM или WAAM может приводить к образованию на поверхности заготовок из жаропрочных сплавов упрочненного поверхностного слоя с крайне высокой твердостью, что существенно осложняет последующую механическую обработку. Для инконеля этот эффект может быть еще более выраженным из-за его уникальных свойств и более высокой температуры плавления.

Параметры процесса электродуговой наплавки, такие как температура подложки, скорость и траектория движения горелки [16, 17], существенно влияют на формирование микроструктуры и, как следствие, на механические свойства получаемой заготовки. Даже при оптимизации этих параметров неизбежно возникают структурные дефекты, такие как локальное упрочнение поверхности, неоднородность распределения фаз и микропор, что снижает предсказуемость механических свойств. WAAM как один из методов аддитивного производства характеризуется образованием анизотропной микроструктуры с неравномерным распределением напряжений и свойств по объему детали [18–20]. Это обусловлено послойным характером процесса наплавки, неравномерностью нагрева и охлаждения, а также внутренними напряжениями, возникающими в процессе кристаллизации расплава.

Помимо неоднородности структуры технология WAAM часто приводит к образованию заготовок с низким качеством поверхности, требующей обязательной последующей механической обработки [21–23]. Это связано с неравномерностью наплавки, образованием наплывов, пористостью и другими дефектами поверхности. Необходимость дополнительной обработки значительно увеличивает общую стоимость производства и время изготовления детали. Для жаропрочных сплавов, обладающих высокой прочностью и твердостью, этот недостаток особенно актуален, так как обработка таких материалов требует применения высокопрочного инструмента и оптимизированных режимов резания, что еще больше усложняет процесс и повышает его стоимость [24, 25].

Сложные термические циклы, присущие технологии WAAM, приводят к образованию неоднородной микроструктуры в получаемых заготовках, что существенно осложняет последующую механическую обработку. Эта неоднородность проявляется в значительных вариациях твердости, прочности и других механических свойств по объему детали, особенно ярко выраженных при использовании жаропрочных сплавов. В работе [26] показано, что фрезерование образцов сплава Ti6Al4V, изготовленных методом WAAM, приводит к значительному износу инструмента (например, концевой фрезы из Al₂O₃/Si₃N₄, сиалона) по сравнению с обработкой кованных или литых образцов. Эта повышенная абразивность обусловлена как неоднородностью микроструктуры, так и наличием остаточных напряжений, возникающих в процессе наплавки. Повышенная твердость отдельных зон, микротрещины и неравномерность распределения фаз способствуют быстрому изнашиванию режущего инструмента. Для снижения износа и повышения стойкости инструмента при обработке жаропрочных сплавов, полученных методом WAAM, можно использовать несколько стратегий [27, 28]. К ним относятся оптимизация режимов резания (скорости резания, подачи, глубины резания), применение современных высокопрочных и износостойких инструментальных материалов, а также использование эффективных систем охлаждения, например криогенного охлаждения. Выбор оптимальной стратегии зависит от конкретного жаропрочного сплава, требуемого качества обработки и экономических соображений. Необходимо учитывать, что для жаропрочных сплавов, отличающихся высокой твердостью и прочностью, повышенная стойкость инструмента является критическим фактором, влияющим на производительность и экономическую эффективность процесса механической обработки [29].

Один из подходов к снижению износа инструмента при обработке деталей, изготовленных методом WAAM, заключается в оптимизации параметров процесса наплавки для получения требуемых поверхностных свойств. Контролируя параметры процесса (скорость наплавки, параметры электрической дуги, температуру подложки и др.), можно влиять на формирование микроструктуры и, следовательно, на твердость

и абразивность поверхности. Это особенно актуально для жаропрочных сплавов, где неоднородность структуры определяет интенсивность износа инструмента. Для количественного анализа неоднородности микротвердости в заготовках из жаропрочных сплавов, полученных методом WAAM, были разработаны и применены специальные методики агрегирования данных, позволяющие оценивать средние значения твердости и ее вариации в различных зонах детали [30]. Такой подход позволяет более точно предсказывать износ инструмента и оптимизировать режимы обработки.

Использование комбинированных методов аддитивного производства, сочетающих различные технологии наплавки или добавляющие промежуточные стадии обработки, может способствовать получению более однородной структуры и, следовательно, улучшению обрабатываемости жаропрочных сплавов. Однако, несмотря на эти усилия, исследования [31] показывают, что обработка заготовок из жаропрочных сплавов, изготовленных методами аддитивного производства (WAAM, SLM и др.), часто сопровождается увеличением сил резания по сравнению с обработкой деталей, полученных традиционными методами (ковка, литье). Это объясняется не только неоднородностью структуры, но и наличием остаточных напряжений, микропор и других дефектов, характерных для аддитивных технологий. Работа [31] подтверждает высокую вариабельность сил резания при обработке WAAM-заготовок даже при использовании одинаковых режимов обработки, что подчеркивает важность индивидуального подбора параметров резания для каждой конкретной детали.

Исследований, посвященных субтрактивной обработке деталей, изготовленных методом электродуговой наплавки (WAAM), крайне мало. Это обусловлено рядом факторов, включая сложность предсказания свойств материала после наплавки и необходимость применения специфических методов обработки, учитывающих особенности микроструктуры. В частности, использование WAAM для создания заготовок из жаропрочных и коррозионно-стойких сплавов, таких как инконель 625, сопряжено с дополнительными трудностями, связанными с высокой твердостью и прочностью материала. Поэтому разработка и оптимизация

режимов обработки заготовок из инконеля 625, полученных методом WAAM, представляют собой актуальную задачу, требующую комплексного подхода. Необходимость определения оптимальных параметров резания для минимизации износа инструмента, повышения производительности и обеспечения требуемого качества поверхности делает данную тему особенно значимой для развития аддитивных технологий и их промышленного применения.

Цель этой работы: с помощью проведенных исследований определить режимы фрезерования заготовок из инконеля 625, изготовленных электродуговой наплавкой (WAAM).

Материалы и методики

Для проведения исследования сил резания, которые возникают при обработке заготовок из инконеля 625, изготовленных методом электродуговой наплавки (WAAM), было напечатано пять образцов. Геометрические размеры каждого образца составляли 25 мм (высота) × 75 мм (ширина) × 25 мм (длина). Эта форма и размеры выбраны для обеспечения достаточной жесткости образцов при фрезеровании и минимизации влияния зажимов на результаты эксперимента. Применение стандартных размеров позволяет сравнивать результаты с данными других исследований.

Образцы были изготовлены методом WAAM с использованием проволоки из инконеля 625 (состав сплава приведен в таблице). Выбор инконеля 625 обусловлен его широким применением в высокотемпературных условиях и сложной микроструктурой, что позволяет исследовать влияние WAAM-процесса на механические свойства и обрабатываемость материала. Для обеспечения воспроизводимости результатов процесс наплавки проводился с использованием строго контролируемых параметров (скорости наплавки, напряжения дуги, расхода защитного газа и др.), оптимизированных для получения

минимального количества дефектов и максимально однородной микроструктуры. Эти параметры будут подробно описаны в соответствующем разделе исследования.

Изготовление образцов с помощью электродуговой наплавки

Образцы были напечатаны на установке электродуговой наплавки проволокой. Данное оборудование разработано и изготовлено в Томском политехническом университете. Изготовление образцов из инконеля методом WAAM осуществлялось по следующей технологии. Сначала создавалась компьютерная 3D-модель с использованием САD-системы. Затем эта модель разбивалась на отдельные слои, каждый из которых предстояло наплавить.

Процесс послойного наплавления осуществлялся на 3D-принтере с использованием заданных параметров: сила тока составляла 115...135 А, напряжение – 21...24 В, скорость наплавки – 300 мм/мин. В качестве источника питания применялся инверторный выпрямитель, что обеспечивает высокую стабильность процесса и контроль параметров наплавки. Наплавка происходила на подвижном столе, обеспечивающем точное позиционирование по осям X и Y , что гарантирует точное воспроизведение геометрических параметров модели. Позиционирование наплавляемой горелки по оси Z контролировалось для точного и однородного наплавления слоев. Плавление проволоки и подплавление подложки (или предыдущего слоя) происходило с помощью управляемой траектории перемещения горелки, что гарантирует точное наплавление и минимальное отклонение от модели. Толщина наплавляемого слоя варьировалась от 2 до 5 мм в зависимости от выбранных режимов наплавки и требуемой точности. Указанные режимы наплавки были оптимизированы для достижения желаемого качества и минимального количества дефектов, чтобы получить пригодные образцы для последующих этапов исследования.

Химический состав проволоки из никелевого сплава марки инконель 625

Chemical composition of Inconel 625 nickel alloy wire

Химический элемент	Ta	Al	Nb	Mo	Cr	Si	Fe	Co	Ti	Mn	Ni
%	0,3	0,38	2,8	7,5	22,5	0,8	1,3	0,2	0,35	0,1	63,68

При печати в качестве материала подложки использовался тот же материал, что и для проволоки, – жаропрочный никелевый сплав. Печать осуществлялась в среде защитного газа аргона.

Исследование микроструктуры и твердости полученных образцов

Для выявления микроструктурных особенностей образцов инконеля 625, изготовленных методом электродуговой наплавки, было проведено химическое травление. Процесс травления осуществлялся путем погружения образцов в специально подготовленный травильный раствор на протяжении 8 минут. Раствор представлял собой смесь из соляной кислоты (10 мл), плавиковой кислоты (10 мл) и этилового спирта (100 мл). Выбор именно этого состава травителя обусловлен его эффективностью в раскрытии микроструктурных деталей никелевых сплавов, таких как инконель 625, для обеспечения достаточного контраста между различными фазами и границами зерен. После травления образцы были тщательно промыты дистиллированной водой и высушены сжатым воздухом для предотвращения коррозии и обеспечения высокой точности анализа. Полученные после травления образцы исследовались с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss AxioMAT, обеспечивающего высокое разрешение и точность измерений. Применение данного микроскопа позволило получить детальные изображения микроструктуры, включая анализ размера и формы зерен, выявление дендритной структуры, определение наличия вторичных фаз и других структурных неоднородностей, которые напрямую связаны с параметрами процесса электродуговой наплавки и влияют на механические свойства материала. Полученные микрофотографии были использованы для количественного анализа микроструктуры, включая измерение размера зерен, определение степени дендритности и оценку объемной доли вторичных фаз.

Исследование сил резания при фрезеровании

Экспериментальное исследование фрезерования проводилось на высокоточном обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) модели CONCEPTMill 155 производства компании EMCO. Выбор данной

модели обусловлен ее высокой жесткостью, точностью позиционирования и возможностью проведения контролируемых экспериментов. Для точного измерения сил резания в процессе фрезерования использовался высокочувствительный шестикомпонентный динамометрический датчик Kistler 9257B (Швейцария), обладающий высокой чувствительностью (7,5 Н) и низкой погрешностью измерения ($\pm 0,005\%$), что обеспечивало достоверность полученных данных. Обработка и анализ экспериментальных данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения DynoWare, позволяющего проводить комплексный анализ сил резания, выявлять их динамические характеристики и учитывать влияние различных параметров обработки. Общий разброс результатов измерений сил резания не превышал 15 %, что обусловлено прежде всего сложностью точной настройки параметров фрезерования (ширины и глубины резания) и неизбежным износом режущего инструмента в процессе многократных экспериментов.

В качестве режущего инструмента была выбрана твердосплавная концевая фреза диаметром 8 мм, произведенная компанией МИОН. Данная фреза была выбрана из-за ее высокой прочности и износостойкости, необходимых для обработки высокопрочного и абразивного материала – инконеля 625. Твердосплавный материал фрезы состоит преимущественно из карбидов вольфрама, обеспечивающих высокую твердость и износостойкость режущей кромки, и кобальтовой связки (приблизительно 8 %), которая отвечает за прочность и связность карбидных зерен. Конструкция фрезы включала в себя четыре зуба, что обеспечивало достаточную интенсивность съема материала, но требовало тщательного контроля параметров резания для предотвращения перегрева и вибраций. Геометрия фрезы (угол заточки, передний и задний углы) была стандартной для данного типа инструмента и не подвергалась модификации для настоящего исследования. Выбор именно этого инструмента был обусловлен его доступностью, хорошо изученными характеристиками и подходящими для данного исследования параметрами. Угол винтовой канавки $\omega = 35^\circ$, задний угол – 5° , передний угол – 7° . В экспериментах использовали сухое фрезерование.

Результаты и их обсуждение

Получение образцов электродуговой наплавкой и исследование их микроструктуры

В первую очередь были получены образцы для проведения исследований. Было изготовлено пять образцов с помощью WAAM-технологии для проведения необходимого объема исследований. Фотография полученной заготовки и схема отбора образцов для металлографических исследований показаны на рис. 1.

Микроструктура образцов из инконеля 625, полученных методом электродуговой наплавки (WAAM), представлена на рис. 2. На микрофотографии, сделанной с помощью оптического микроскопа, в центре образца отчетливо видна удлиненная ячеистая структура. Характерной особенностью является наличие ярких включений (вероятно, вторичных фаз или частиц окислов) в межзеренных областях (между дендритами). Это указывает на сложность фазовых превращений и возможные неоднородности, возникающие в процессе наплавки. На изображении также хорошо различима дендритная структура. Дендриты, формирующиеся при затвердевании расплавленного инконеля, имеют заметные оси первого порядка, протяженные в одном направлении. Оси второго порядка, как правило, значительно менее выражены или отсутствуют, что указывает на специфику кристаллизации, вызванную процессами быстрой наплавки. Такая особенность микроструктуры связана с высокими скоростями охлаждения,

характерными для WAAM. Кроме того, анализ микроструктуры свидетельствует о заметной текстуре в зернах. Наличие текстуры может указывать на предпочтительные направления роста кристаллитов, обусловленные направленным тепловым потоком и напряженным состоянием материала во время наплавки. Эти особенности текстуры и дендритной структуры существенно влияют на механические свойства готовых образцов из инконеля 625, полученных методом WAAM.

Различные скорости охлаждения, характерные для процесса электродуговой наплавки, приводят к образованию зерен различного размера в образцах из инконеля 625. Микроструктура характеризуется дендритным строением, где кристаллы вытянуты вдоль направления отвода тепла. Это направление совпадает с направлением наращивания слоев при WAAM. Наблюдается закономерность увеличения размеров зерен по мере удаления от подложки. В исследуемых образцах длина дендритов достигала 0,3...0,5 мм. Это согласуется с данными других исследователей, изучающих микроструктуру инконеля 625, полученного аддитивными методами. Например, в работе [6] при использовании селективного лазерного плавления (SLM) была отмечена длина зерен около 1 мм в образцах из инконеля 625. Различие в размерах зерен может быть объяснено разными скоростями охлаждения, характерными для WAAM и SLM. Результаты проведенных исследований также подтверждают данные работ [11, 16], где показано, что в нижней части образца инконеля 625 (ближе к подложке) пре-

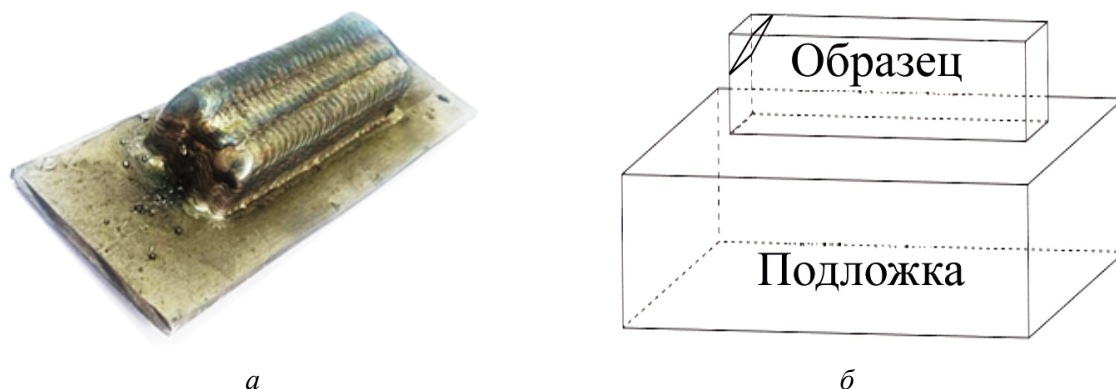


Рис. 1. Фотография напечатанной с помощью WAAM-технологии заготовки (а) и схема вырезания образца (б) для исследований

Fig. 1. Photograph of a printed workpiece (a) using WAAM technology and a diagram of the sample cutout (b) for research



Рис. 2. Микроструктура образцов, полученных с помощью WAAM-технологии

Fig. 2. Microstructure of the samples obtained using WAAM technology

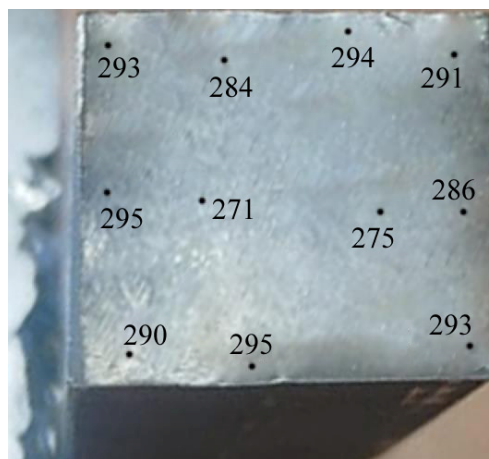


Рис. 3. Микротвердость образца, полученного с помощью WAAM-технологии

Fig. 3. Microhardness of the samples obtained using WAAM technology

обладают равноосные зерна. По мере удаления от подложки и нарастания новых слоев зерна вытягиваются вдоль направления теплоотвода, проявляется текстура, и их длина существенно увеличивается. Совпадение наблюдаемых закономерностей с результатами работ [11, 16] подтверждает результаты и позволяет сделать вывод о влиянии теплового потока и скорости охлаждения на формирование микроструктуры в образцах инконеля 625, полученных методом WAAM.

Микротвердость

Микротвердость заготовок определяли методом Виккерса при нагрузке 1 кгс с выдержкой 10 с как среднее значение двадцати отпечатков в разных местах.

Анализ результатов измерения микротвердости образцов показывает (рис. 3), что твердость в их центре меньше по сравнению с краями. Центральные области образца охлаждаются медленнее, чем периферийные. Внешние слои быстрее отдают тепло в окружающую среду, что приводит к более быстрому затвердеванию и образованию более мелкозернистой структуры с повышенной твердостью. Центральные же участки охлаждаются медленнее, что способствует росту более крупных зерен и, следовательно, снижению твердости. Это хорошо согласуется с полученными данными металлографического анализа. Такая структура будет оказывать влияние на режимы обработки заготовок и на возникающие при обработке силы резания.

Исследование сил резания при механической обработке образцов

Представленные ниже результаты экспериментального исследования фокусируются на анализе сил резания при фрезеровании образцов из инконеля 625, изготовленных методом электродуговой наплавки. Целью эксперимента было изучение влияния различных параметров резания на величину сил, возникающих при обработке материала, с учетом его высокой твердости и неоднородной микроструктуры, характерной для WAAM-технологии.

Для обеспечения контролируемых условий эксперимента в рассматриваемой серии экспериментов ширина фрезерования B была постоянной и составляла 2 мм. Это условие гарантировало, что при небольшой глубине фрезерования $t = 1$ мм в процессе резания одновременно участвует только один зуб, что позволяет получить графики изменения сил резания на одном зубе в процессе поворота зуба фрезы при вращении фрезы (рис. 5).

Наличие угла наклона винтовой линии главной режущей кромки зуба на периферии фрезы $\omega = 40^\circ$ (иногда используются символы β или ψ) также вынуждает уменьшить ширину фрезерования B . При увеличении ширины фрезерования в резание может начать вступать последующий зуб, хотя предыдущий еще не закончил резание. Этот фактор более важен для фрез небольшого диаметра ($d_{\text{фрезы}} < 12$ мм) и при увеличении глубины фрезерования $t > 0,4d_{\text{фрезы}}$.

В качестве основного варьируемого параметра резания в рассматриваемой серии экспериментов была выбрана минутная подача $f_{\text{мин}}$, в то время как другие параметры резания (глубина резания t и скорость резания V) были постоянными. Такой подход позволил оценить влияние минутной подачи на величину сил резания изолированно от других факторов.

Экспериментальные данные о силах резания были обработаны с использованием метода наименьших квадратов для аппроксимации эмпирических зависимостей. Это позволило получить аналитические выражения, описывающие зависимость сил резания от минутной подачи. Для наглядного представления результатов эксперимента были построены графики, на которых отображены максимальные значения сил резания в каждом цикле обработки (рис. 4). Использование максимальных значений сил резания позволяет избежать искажения общей картины влияния параметра $f_{\text{мин}}$ из-за колебаний сил, которые неизбежно возникают в процессе фрезерования по причине изменения толщины среза на зубе при вращении фрезы, неизбежного наличия небольшого радиального биения зубьев при изготовлении фрезы и ее закреплении в цанговом патроне,

неравномерности структуры обрабатываемого материала и небольших вибраций в системе «станок – инструмент – заготовка». Такой подход позволяет получить более обобщенные и надежные результаты, отражающие общую тенденцию изменения сил резания в зависимости от минутной подачи, тем более что на разрушение зуба фрезы влияет наибольшая сила на каком-либо зубе.

Графики изменения силы подачи P_h (направление силы P_h действует вдоль вектора направления подачи стола), боковой силы P_v (направление силы P_v перпендикулярно направлению вектора подачи) и осевой силы P_x (действует вдоль оси фрезы, т. е. при концевом фрезеровании – вертикально) при изменении минутной подачи $f_{\text{мин}}$ показаны на рис. 4. При направлении подачи поперек образца наибольшие силы Ph_{max} и Pv_{max} больше, и их увеличение при росте подачи происходит более интенсивно, т. е. имеется влияние направления синтеза при использовании аддитивных технологий. Осевая сила Px_{max} практически не изменяется при увеличении подачи, но и она немного больше при подаче поперек образца.

На рис. 4 график 2 (Pv_{max} вдоль) имеет перегиб при подаче $f_{\text{мин}} = 80$ мм/мин, но это явление не

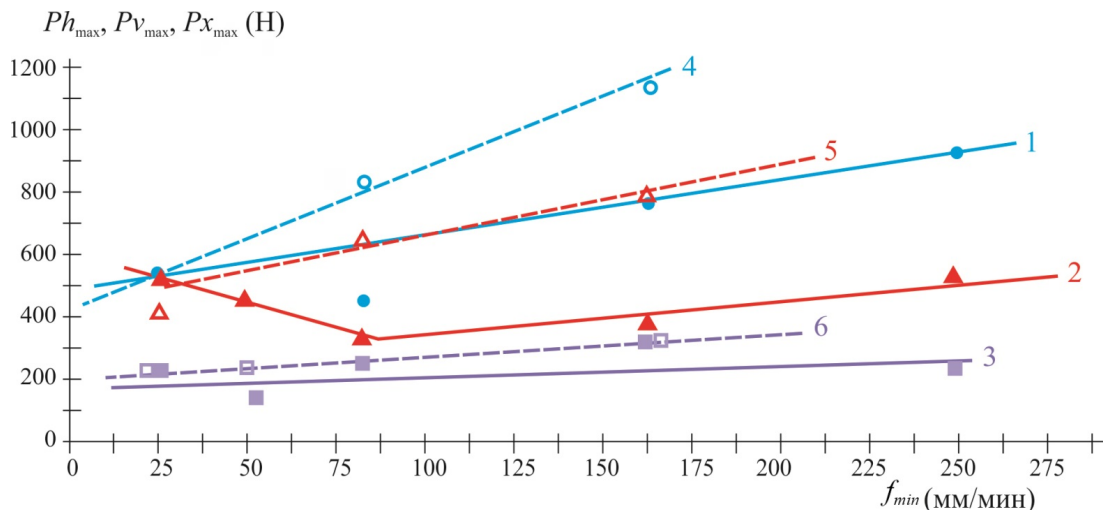


Рис. 4. График изменения наибольших значений сил резания P_h , P_v и P_x (Н) в зависимости от подачи $f_{\text{мин}}$, мм/мин (ширина фрезерования $B = 2$ мм, скорость резания $V = 15,8$ м/мин, глубина фрезерования $t = 1$ мм).

Подача вдоль образца: 1 – Ph_{max} , 2 – Pv_{max} , 3 – Px_{max} ; подача поперек образца: 4 – Ph_{max} , 5 – Pv_{max} , 6 – Px_{max}

Fig. 4. Graph of the change in the highest values of cutting forces P_h , P_v and P_x (N) depending on the feed rate $f_{\text{мин}}$ (mm/min) ($B = 2$ mm, $V = 15,8$ m/min, $t = 1$ mm).

Feed along the sample: 1 – Ph_{max} , 2 – Pv_{max} , 3 – Px_{max} ; feed across the sample: 4 – Ph_{max} , 5 – Pv_{max} , 6 – Px_{max}

наблюдается при подаче поперек образца – график 5 ($P_{v_{\max}}$ поперёк). При подаче $f_{\min} = 80$ мм/мин наблюдается уменьшение силы подачи Ph_{\max} вдоль (график 1), но остальные точки этой силы располагаются на прямой линии.

Анализ графиков сил резания, показанных на рис. 4, демонстрирует характерные силовые взаимодействия между фрезой и заготовкой. Вектор силы P_v измеряется динамометром с отрицательным значением. Это указывает на то, что эта составляющая силы, обусловленная радиальным воздействием зубьев фрезы, направлена от оператора, т. е. противоположно направлению оси OY . Для удобства визуализации на рисунке вектор $P_{v_{\max}}$ показан в положительном направлении оси, хотя его фактическое направление противоположно. Аналогично сила P_x , также имеющая отрицательное значение, направлена против оси OZ . Это следствие положительного угла наклона винтовой канавки ω фрезы, что приводит к вертикальному подтягиванию заготовки. Важно отметить, что при анализе величин сил P_v и P_x учитываются их абсолютные значения, поскольку именно они отражают интенсивность силового воздействия. В то же время сила P_h имеет положительное значение, что соответствует направлению оси OX , определяющему основное усилие резания.

Анализ графиков максимальных значений сил резания Ph_{\max} и Pv_{\max} в зависимости от минимальной минутной подачи f_{\min} (см. рис. 4) при глубине резания 3 мм и прочих постоянных параметрах резания демонстрирует их прибли-

зительно линейную взаимосвязь. Это позволяет использовать линейные уравнения для аппроксимации этих зависимостей в рассматриваемом диапазоне параметров. Наблюдается закономерность: при синтезе заготовок и направлении подачи вдоль оси обработки величины максимальных сил Ph_{\max} , Pv_{\max} и Px_{\max} незначительно меньше, чем при перпендикулярном направлении подачи. Это различие, как видно из рис. 4, не является значительным, но показывает влияние направления подачи на силовые характеристики процесса фрезерования. Разница в силовых показателях может быть обусловлена изменением условий контакта инструмента с заготовкой, в частности изменением площади контакта режущей кромки и глубины врезания в зависимости от направления подачи. Дополнительные исследования, включающие анализ угла наклона зубьев фрезы, геометрии режущей кромки и свойств обрабатываемого материала, необходимы для более точного объяснения этого явления. Более того, некоторые факторы, такие как наличие вибраций и влияние смазочно-охлаждающей жидкости, также могут вносить свой вклад в наблюдаемые различия. Более точная модель, учитывающая все эти факторы, позволит точнее прогнозировать силовые характеристики и оптимизировать технологический процесс.

Рис. 5 демонстрирует неожиданное явление при фрезеровании 4-зубным инструментом при глубине резания 3 мм. Несмотря на теоретическое предположение о контакте только одного зуба с заготовкой в каждый момент времени, что

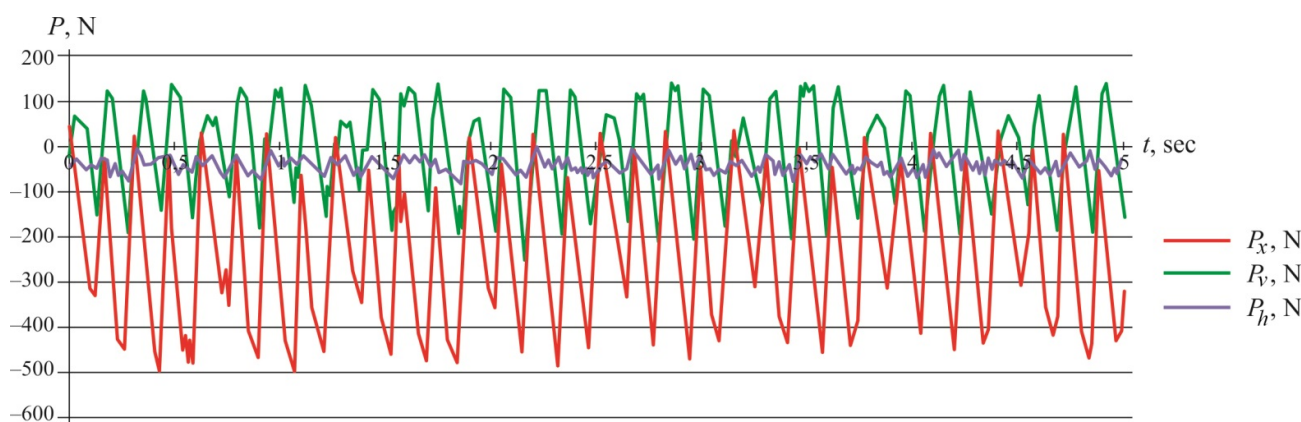


Рис. 5. Пример графика изменения составляющих силы от времени резания в процессе фрезерования вдоль направления выращивания ($B = 2$ мм, $V = 16$ м/мин, $t = 3$ мм, $f_{\min} = 25$ мм/мин)

Fig. 5. Example of a graph showing the change in force components over cutting time during milling process along the growing direction ($B = 2$ мм, $V = 16$ м/мин, $t = 1$ мм, $f_{\min} = 25$ мм/мин)

должно было бы приводить к периодическому обнулению силы резания, наблюдается непрерывное воздействие, наиболее ярко выраженное на графике силы подачи P_h (фиолетовая кривая). Более того, рост минимального значения силы P_h с увеличением подачи свидетельствует о комплексном взаимодействии инструмента и заготовки, выходящем за рамки простой модели однозубного резания. Анализ кривой силы резания P_h демонстрирует четкую картину, состоящую из четырех выраженных пиков и впадин. Эта периодичность однозначно указывает на то, что в процессе резания участвуют все четыре зуба фрезы, каждый из которых оставляет свой отпечаток на кривой. Наблюдаются небольшие, но заметные колебания амплитуды этих пиков, свидетельствующие о незначительном радиальном биении зубьев. Однако важно отметить, что максимальные значения силы P_h для соседних зубьев практически идентичны. Это равенство амплитуд для соседних зубьев говорит о том, что радиальное расстояние каждого из них от оси вращения фрезы одинаково. Данный факт позволяет с высокой степенью уверенности исключить любое смещение оси фрезы относительно цангового патрона в качестве причины регистрируемых колебаний силы резания.

Таким образом, мы приходим к выводу, что выявленные неравномерности в силовых характеристиках резания являются результатом технологических отклонений, допущенных на этапе производства фрезы. Эти отклонения, вероятно, заключаются в несовершенстве геометрии зубьев или в неточностях их размещения. В то же время можно утверждать, что установка и фиксация фрезы в патроне выполнены корректно и не являются причиной наблюдаемого явления. Детальное изучение кривой изменения силы P_h , демонстрирующей четкую повторяемость пиков и впадин, подтверждает это заключение, позволяя сосредоточить дальнейший анализ на технологических аспектах процесса изготовления инструмента. Необходимо провести более детальный анализ геометрии фрезы для определения точных причин этих отклонений от идеальной геометрии и оценки их влияния на качество обработки и точность размеров получаемой детали.

Анализ динамики силы резания P_h (см. рис. 4), являющейся наиболее показательной и легко на-

блюдаемой составляющей силового взаимодействия, выявляет приблизительно симметричные характеры ее нарастания и спада при встречном фрезеровании. Это несколько противоречит ожидаемой асимметрии, обусловленной значительно более коротким периодом выхода зуба из зоны резания по сравнению с периодом его входа. Теоретически быстрое уменьшение толщины среза перед полным выходом зуба должно приводить к более крутому спаду силы P_h . Это объясняется изменением ориентации вектора силы P_z при приближении зуба к точке выхода. В момент, предшествующий выходу зуба фрезы из зоны контакта, происходит поворот P_z в направлении вращения фрезы. Это дает более значительное увеличение радиальной составляющей силы P_y , чем силы P_h . В результате снижение силы P_h начинается раньше – еще до того, как главная режущая кромка полностью покидает зону контакта с заготовкой.

Наличие угла наклона режущей кромки, обозначаемого как ω (или β в некоторых зарубежных публикациях), играет ключевую роль в процессе фрезерования. Этот угол препятствует тому, чтобы вся режущая кромка одновременно входила в зону контакта с обрабатываемой заготовкой или выходила из нее. Вместо резкого прекращения резания происходит более постепенный процесс. Отдельные участки режущей кромки последовательно выходят из взаимодействия с материалом. Ширина фрезерования B и угол наклона ω оказывают существенное влияние на плавность снижения всех составляющих силы резания – осевой P_x , тангенциальной P_z и радиальной P_y . Чем больше значения этих параметров, тем более плавным и менее резким будет спад сил резания при выходе зуба из зоны обработки. Это объясняется тем, что более широкий инструмент и больший угол наклона обеспечивают более постепенное изменение площади контакта между инструментом и заготовкой. Более плавный спад сил резания, в свою очередь, приводит к снижению вибраций и улучшению качества обработки.

Однако в процессе фрезерования, особенно при встречном фрезеровании, наблюдается сложное взаимодействие нескольких факторов. Вращательное движение фрезы, изменение ориентации векторов сил P_z и P_y , а также одновременное изменение толщины среза a приводят

к некоторому фазовому сдвигу между изменениями сил. Этот сдвиг проявляется в том, что изменение радиальной силы P_y (на графике рис. 4 – боковой P_y) не совпадает идеально по времени с изменением тангенциальной силы P_z (на графике рис. 4 – силы подачи P_h). Этот фазовый сдвиг, хотя и незначительный, является следствием динамических процессов, протекающих в зоне резания, и влияет на общую картину силового взаимодействия. Понимание взаимосвязи между геометрическими параметрами инструмента (ω и B), кинематикой процесса (вращение фрезы) и динамикой сил резания (P_z , P_y , P_h , P_v) необходимо для оптимизации процесса фрезерования и достижения наилучшего качества обработки (см. рис. 5). Более точное моделирование процесса требует учета всех этих факторов, а также влияния геометрии инструмента, свойств обрабатываемого материала и параметров резания.

Заключение

Исследование фрезерования заготовок из жаропрочного сплава инконель 625, полученных методом электродуговой наплавки, выявило ряд ключевых зависимостей и закономерностей, имеющих практическое значение для оптимизации технологического процесса.

Микроструктура образцов из инконеля 625, сформированная методом WAAM, оказывает существенное влияние на силы резания. Анализ микроструктуры показал неоднородность распределения твердости и размера зерен, обусловленную неравномерным нагревом и охлаждением при послойном наращивании. Установлена корреляция между локальными изменениями микротвердости и силами резания – повышенная твердость в поверхностных слоях и отдельных зонах образца приводила к увеличению сил резания и более интенсивному износу инструмента по сравнению с традиционно изготовленными деталями. Это подчеркивает необходимость адаптации режимов резания к специфическим особенностям микроструктуры заготовок, полученных методом WAAM.

Оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимизацию сил резания и износа инструмента, существенно зависят от конкретных параметров обработки. Для фрезерования заготовок из инконеля 625, полученных WAAM-

технологией, оптимально использовать высокопрочные твердосплавные фрезы с повышенной износостойкостью. Возможно применение фрез с износостойкими покрытиями (например, TiAlN, AlCrN) для увеличения срока службы инструмента. Лучше всего применять фрезы специальной геометрии и большего диаметра, чем при обработке стали 40X13. Увеличение диаметра фрезы более 8 мм приводит к повышению стоимости фрезы пропорционально квадрату диаметра фрезы. Для грубой обработки следует рассмотреть использование фрез с увеличенным углом наклона винтовой канавки с целью более плавного входа и выхода из материала и снижения вибраций. Фрезерование рекомендуется начинать с небольших значений скорости резания (например, при $V = 15,8$ м/мин). Затем можно постепенно увеличивать скорость, контролируя при этом температуру режущей кромки и износ инструмента. Следует избегать слишком высоких подач (80 мм/мин и более при подаче вдоль образца), особенно при фрезеровании перпендикулярно направлению наплавки, чтобы не вызывать чрезмерных сил резания и износ инструмента.

Использование попутной схемы фрезерования при обработке сплава инконель 625 категорически недопустимо, так как это приводит к рывкам стола и поломке фрезы, что особенно проявляется при подаче более 40 мм/мин. Чрезмерное увеличение скорости резания (более 50 м/мин) при фрезеровании сплава инконель 625 приводит к налипанию обрабатываемого материала на зуб фрезы из-за увеличения температуры в зоне резания, что, в свою очередь, может привести к резкому увеличению сил резания и поломке фрезы.

Увеличение количества зубьев при неизменном диаметре фрезы приводит к привариванию стружки к стружечной винтовой канавке, а также к резкому увеличению температуры в зоне резания из-за трения спрессованного материала стружки в канавке с поверхностью резания и выхода фрезы из рабочего состояния.

Применение специализированного инструмента является необходимым условием эффективной обработки. Повышенная абразивность и неоднородность образцов из инконеля 625, полученных методом WAAM, требуют использования высокопрочных твердосплавных фрез

с повышенной износостойкостью и потенциально – специальной геометрии. Разработанные в рамках исследования эмпирические зависимости, а также рекомендации по выбору инструмента и подбору режимов резания для фрезерования заготовок из инконеля 625, полученных методом WAAM, позволят повысить эффективность и производительность обработки аддитивно изготовленных деталей. Однако необходимы дальнейшие исследования для более глубокого понимания влияния остаточных напряжений и развития методов их контроля. Это позволит оптимизировать процессы фрезерования для достижения высоких значений качества обработки, производительности и экономической эффективности.

Список литературы

1. Alvarez L.F., Garcia C., Lopez V. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels // ISIJ International. – 1994. – Vol. 34 (6). – P. 516–521. – DOI: 10.2355/isijinternational.34.516.
2. On the microstructure and corrosion behavior of wire arc additively manufactured AISI 420 stainless steel / M. Kazemipour, J.H. Lunde, S. Salahi, A. Nasiri // TMS 2020: 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. – Cham: Springer, 2020. – P. 435–448. – DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6_41.
3. Liverani E., Fortunato A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117 (3–4). – P. 809–821. – DOI: 10.1007/s00170-021-07639-6.
4. Ultra-high strength martensitic 420 stainless steel with high ductility / K. Saeidi, D.L. Zapata, F. Lofaj, L. Kvetkova, J. Olsen, Z. Shen, F. Akhtar // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 29. – P. 100803. – DOI: 10.1016/j.addma.2019.100803.
5. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels / P. Krakhmalev, I. Yadroitsava, G. Fredriksson, I. Yadroitsev // Materials & Design. – 2015. – Vol. 87. – P. 380–385. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.045.
6. Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties / J. Ge, J. Lin, Y. Chen, Y. Lei, H. Fu // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 748. – P. 911–921. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.222.
7. Process parameters effect on weld beads geometry deposited by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) / S. Manokruang, F. Vignat, M. Museau, M. Limousin // Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, June 2–4, 2020. – Cham: Springer, 2021. – P. 9–14. – DOI: 10.1007/978-3-030-70566-4_3.
8. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review // Journal of Machine Engineering. – 2018. – Vol. 18 (4). – P. 5–24. – DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.
9. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) / J.G. Lopes, C.M. Machado, V.R. Duarte, T.A. Rodrigues, T.G. Santos, J.P. Oliveira // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 59. – P. 739–749. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.007.
10. New observations on wear characteristics of solid Al₂O₃/Si₃N₄ ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V / J. Dang, H. Zhang, W. Ming, O. An, M. Chen // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46 (5). – P. 5876–5886. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.
11. Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy / A. Bordin, S. Bruschi, A. Ghiotti, P.F. Bariani // Wear. – 2015. – Vol. 328–329. – P. 89–99. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.030.
12. Influence of finish machining on the surface integrity of Ti6Al4V produced by selective laser melting / S. Milton, A. Morandea, F. Chalou, R. Leroy // Procedia Cirp. – 2016. – Vol. 45. – P. 127–130. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.340.
13. Keist J.S., Palmer T.A. Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys // Materials Science and Engineering: A. – 2017. – Vol. 693. – P. 214–224. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.102.
14. The effect of finish-milling operation on surface quality and wear resistance of Inconel 625 produced by selective laser melting additive manufacturing / E. Tascioglu, Yu. Kaynak, Ö. Poyraz, A. Orhangül, S. Ören // Advanced Surface Enhancement (INCASE 2019). – Singapore: Springer, 2020. – P. 263–272. – DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_27.
15. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy / F. Montevercchi, N. Grossi, H. Takagi, A. Scippa, H. Sasahara, G. Campatelli // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 46. – P. 476–479. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.034.
16. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process / F. Hojati, A. Daneshi, B. Soltani, B. Azarhoushang, D. Biermann // Precision Engineering. – 2020. – Vol. 62. – P. 1–9. – DOI: 10.1007/s00170-020-06391-7.



17. Gong Y., Li P. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 33 (5). – P. 2387–2395. – DOI: 10.1007/s12206-019-0237-x.

18. Ni Ch., Zhu L., Yang Zh. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view // *Wear*. – 2019. – Vol. 436. – P. 203006. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.

19. Xiong X., Haiou Z., Guilan W. A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling // *Rapid Prototyping Journal*. – 2008. – Vol. 14 (1). – P. 53–56. – DOI: 10.1108/13552540810841562.

20. SLS setup and its working procedure / R. Ahmetshin, V. Fedorov, K. Kostikov, N. Martyushev, V. Ovchinnikov, A. Rasin, A. Yakovlev // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – P. 477–481. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.477.

21. Martyushev N., Petrenko Yu. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 174–178. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.

22. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy / M.E. Isametova, N.V. Martyushev, Y.I. Karlina, R.V. Kononenko, V.Y. Skeebea, B.N. Absadykov // *Materials*. – 2022. – Vol. 15 (19). – P. 6682. – DOI: 10.3390/ma15196682.

23. Provision of rational parameters for the turning mode of small-sized parts made of the 29 NK alloy and beryllium bronze for subsequent thermal pulse deburring / N.V. Martyushev, D.A. Bublik, V.V. Kukartsev, V.S. Tynchenko, R.V. Klyuev, Y.A. Tynchenko, Y.I. Karlina // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (9). – P. 3490. – DOI: 10.3390/ma16093490.

24. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. The determination of yield strength from hardness measurements // *Metallurgical Transactions*. – 1971. – Vol. 2 (7). – P. 1979–1983. – DOI: 10.1007/bf02913433.

25. Abootorabi Zarchi M.M., Razfar M.R., Abdulah A. Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 66. – P. 83–89. – DOI: 10.1007/s00170-012-4307-9.

26. Lou X., Andresen P.L., Rebak R.B. Oxide inclusions in laser additive manufactured stainless steel and their effects on impact toughness and stress corrosion cracking behavior // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 499. – P. 182–190. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.036.

27. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing / X. Chen, J. Li, X. Cheng, H. Wang, Z. Huang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 715. – P. 307–314. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.002.

28. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces / N.V. Martyushev, V.N. Kozlov, M. Qi, V.S. Tynchenko, R.V. Kononenko, V.Y. Konyukhov, D.V. Valuev // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (13). – P. 4529. – DOI: 10.3390/ma16134529.

29. Возможности атомно-силовой микроскопии для исследования микроструктуры нержавеющей стали при различных видах термообработки / Г.В. Шляхова, А.В. Бочкарёва, С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев, Е.В. Мартусевич // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2017. – Т. 60 (2). – С. 133–139. – DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-133-139.

30. Хайдоров А.Д., Юнусов Ф.А. Вакуумная термическая обработка высоколегированных коррозионноустойчивых сталей // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 226–235.

31. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher / V.P. Kondrakhin, R.V. Klyuev, S.N. Sorokova, E.A. Efremkov, D.V. Valuev, Q. Mengxu // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11. – P. 2345. – DOI: 10.3390/math11102345.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





Milling of Inconel 625 blanks fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM)





Nikita Martyshev^{1, a, *}, Victor Kozlov^{1, b}, Aleksandr Boltrushevich^{1, c}, Yulia Kuznetsova^{2, d},
Aleksandr Bovkun^{3, e}



¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Admiral Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martjushev@tpu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>,  kozlov-viktor@bk.ru;

^c  <https://orcid.org/0009-0004-0265-1680>,  aeb20@tpu.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-1388-6125>,  julx@bk.ru;

^e  <https://orcid.org/0000-0002-0623-4284>,  Bovas87@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 December 2024

Revised: 30 December 2024

Accepted: 23 January 2025

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Inconel 625

Wire arc additive manufacturing

(WAAM)

Milling

Cutting forces

Cutting modes

Hardness

Tool wear

Acknowledgements

The research was carried out at the equipment of the Engineering Center “Design and Production of High-Tech Equipment” and the shared research facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. Additive manufacturing technologies, in particular wire arc additive manufacturing (WAAM), have been gaining increasing popularity recently. This method allows for the production of blanks with significantly increased hardness compared to traditional methods such as forging, which in turn significantly increases the cutting force during subsequent machining. The present study is aimed at investigating the cutting forces during milling of samples made from the high-strength, heat-resistant alloy *Inconel 625* obtained by WAAM. **The aim of the work** is to investigate the influence of microstructure and properties of *Inconel 625* fabricated by WAAM, on cutting forces during milling. Particular attention is paid to the search for optimal cutting modes, providing minimization of cutting forces and vibrations in the “machine-utility-tool-part” system. **Methods of research.** Samples were produced by WAAM using wire made from heat-resistant nickel-based alloy *Inconel 625*. A comprehensive analysis of the microstructure of the obtained samples was carried out using modern materials science methods. The main attention is paid to the experimental study of cutting forces during milling using different machining modes (cutting speed, feed rate, and depth of cut) and types of cutters. **Results and Discussion.** The microstructure of *Inconel 625* samples obtained by WAAM is characterized in detail. Optimal milling modes will be determined to ensure efficient machining of the material, taking into account its high hardness and strength. It is expected that machining of *Inconel 625* blanks will require high-strength carbide milling cutters, possibly of special geometry and with increased wear resistance, with a larger diameter compared to milling of steel *0.4 C-13 Cr*. The results of the study allow developing recommendations for selecting optimal cutting modes minimizing cutting force, cutting edge temperature, tool wear and vibrations in the “machine-utility-tool-part” system, thereby improving processing productivity and accuracy.

For citation: Martyshev N.V., Kozlov V.N., Boltrushevich A.E., Kuznetsova Yu.S., Bovkun A.S. Milling of Inconel 625 blanks fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 61–76. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-61-76. (In Russian).

References

1. Alvarez L.F., Garcia C., Lopez V. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels. *ISIJ International*, 1994, vol. 34 (6), pp. 516–521. DOI: 10.2355/isijinternational.34.516.

* Corresponding author

Martyshev Nikita V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Avenue,
634050, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7 3822 60-62-85, e-mail: martjushev@tpu.ru

2. Kazemipour M., Lunde J.H., Salahi S., Nasiri A. On the microstructure and corrosion behavior of wire arc additively manufactured AISI 420 stainless steel. *TMS 2020: 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. Cham, Springer, 2020, pp. 435–448. DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6_41.
3. Liverani E., Fortunato A. Additive manufacturing of AISI 420 stainless steel: process validation, defect analysis and mechanical characterization in different process and post-process conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117 (3–4), pp. 809–821. – DOI: 10.1007/s00170-021-07639-6.
4. Saeidi K., Zapata D.L., Lofaj F., Kvetkova L., Olsen J., Shen Z., Akhtar F. Ultra-high strength martensitic 420 stainless steel with high ductility. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 29, p. 100803. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100803.
5. Krakhmalev P., Yadroitsava I., Fredriksson G., Yadroitsev I. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels. *Materials & Design*, 2015, vol. 87, pp. 380–385. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.045.
6. Ge J., Lin J., Chen Y., Lei Y., Fu H. Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 748, pp. 911–921. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.222.
7. Manokruang S., Vignat F., Museau M., Limousin M. Process parameters effect on weld beads geometry deposited by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III*. Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, June 2–4, 2020. Cham, Springer, 2021, pp. 9–14. DOI: 10.1007/978-3-030-70566-4_3.
8. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review. *Journal of Machine Engineering*, 2018, vol. 18 (4), pp. 5–24. DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.
9. Lopes J.G., Machado C.M., Duarte V.R., Rodrigues T.A., Santos T.G., Oliveira J.P. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 59, pp. 739–749. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.007.
10. Dang J., Zhang H., Ming W., An Q., Chen M. New observations on wear characteristics of solid $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V. *Ceramics International*, 2020, vol. 46 (5), pp. 5876–5886. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.039.
11. Bordin A., Bruschi S., Ghiotti A., Bariani P.F. Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy. *Wear*, 2015, vol. 328–329, pp. 89–99. DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.030.
12. Milton S., Morandau A., Chalon F., Leroy R. Influence of finish machining on the surface integrity of Ti6Al4V produced by selective laser melting. *Procedia Cirp*, 2016, vol. 45, pp. 127–130. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.340.
13. Keist J.S., Palmer T.A. Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 693, pp. 214–224. DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.102.
14. Tascioglu E., Kaynak Y., Poyraz Ö., Orhangül A., Ören S. The effect of finish-milling operation on surface quality and wear resistance of Inconel 625 produced by selective laser melting additive manufacturing. *Advanced Surface Enhancement (INCASE 2019)*. Singapore, Springer, 2020, pp. 263–272. DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1_27.
15. Montevecchi F., Grossi N., Takagi H., Scippa A., Sasahara H., Campatelli G. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 476–479. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.034.
16. Hojati F., Daneshi A., Soltani B., Azarhoushang B., Biermann D. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process. *Precision Engineering*, 2020, vol. 62, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00170-020-06391-7.
17. Gong Y., Li P. Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33 (5), pp. 2387–2395. DOI: 10.1007/s12206-019-0237-x.
18. Ni Ch., Zhu L., Yang Zh. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view. *Wear*, 2019, vol. 436, p. 203006. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.
19. Xiong X., Haiou Z., Guilan W. A new method of direct metal prototyping: hybrid plasma deposition and milling. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, vol. 14 (1), pp. 53–56. DOI: 10.1108/13552540810841562.
20. Ahmetshin R., Fedorov V., Kostikov K., Martyushev N., Ovchinnikov V., Rasin A., Yakovlev A. SLS setup and its working procedure. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 477–481. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.477.

21. Martyushev N., Petrenko Yu. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 174–178. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.
22. Isametova M.E., Martyushev N.V., Karlina Y.I., Kononenko R.V., Skeebe V.Y., Absadykov B.N. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy. *Materials*, 2022, vol. 15 (19), p. 6682. DOI: 10.3390/ma15196682.
23. Martyushev N.V., Bublik D.A., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Klyuev R.V., Tynchenko Y.A., Karlina Y.I. Provision of rational parameters for the turning mode of small-sized parts made of the 29 NK alloy and beryllium bronze for subsequent thermal pulse deburring. *Materials*, 2023, vol. 16 (9), p. 3490. DOI: 10.3390/ma16093490.
24. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. The determination of yield strength from hardness measurements. *Metallurgical Transactions*, 1971, vol. 2 (7), pp. 1979–1983. DOI: 10.1007/bf02913433.
25. Abootorabi Zarch M.M., Razfar M.R., Abdullah A. Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 83–89. DOI: 10.1007/s00170-012-4307-9.
26. Lou X., Andresen P.L., Rebak R.B. Oxide inclusions in laser additive manufactured stainless steel and their effects on impact toughness and stress corrosion cracking behavior. *Journal of Nuclear Materials.*, 2018, vol. 499, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.11.036.
27. Chen X., Li J., Cheng X., Wang H., Huang Z. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 715, pp. 307–314. DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.002.
28. Martyushev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Tynchenko V.S., Kononenko R.V., Konyukhov V.Y., Valuev D.V. Production of workpieces from martensitic stainless steel using electron-beam surfacing and investigation of cutting forces when milling workpieces. *Materials*, 2023, vol. 16 (13), p. 4529. DOI: 10.3390/ma16134529.
29. Shlyakhova G.V., Bochkareva A.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Martusevich E.V. Vozmozhnosti atomno-silovoi mikroskopii dlya issledovaniya mikrostruktury nerzhavayushchei stali pri razlichnykh vidakh termoobrabotki [Application of atomic force microscopy for stainless steel microstructure study at various kinds of heat treatment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60 (2), pp. 133–139. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-133-139.
30. Haidorov A.D., Yunusov F.A. Vakuumnaya termicheskaya obrabotka vysokolegirovannykh korrozionnostoikikh stalei [Vacuum heat treatment of high alloy corrosion-resistant steels]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU = St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 2017, vol. 23 (1), pp. 226–235. DOI: 10.18721/JEST.230123.
31. Kondrakhin V.P., Klyuev R.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Mengxu Q. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher. *Mathematics*, 2023, vol. 11, p. 2345. DOI: 10.3390/math11102345.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).