



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)











## Фрезерование заготовок из мартенситной стали 40X13, полученных с помощью аддитивных технологий

Никита Мартюшев<sup>1, a, \*</sup>, Виктор Козлов<sup>1, b</sup>, Мэнсюй Ци<sup>1, c</sup>, Андрей Багинский<sup>1, d</sup>,  
 Цзэли Хань<sup>1, e</sup>, Александр Бовкун<sup>2, f</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  [martjushev@tpu.ru](mailto:martjushev@tpu.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>,  [kozlov-viktor@bk.ru](mailto:kozlov-viktor@bk.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3738-0193>,  [mensyuy1@tpu.ru](mailto:mensyuy1@tpu.ru); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1544-6406>,  [bagin@tpu.ru](mailto:bagin@tpu.ru);

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6502-6541>,  [hanzelizi@gmail.com](mailto:hanzelizi@gmail.com); <sup>f</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0623-4284>,  [Bovas87@yandex.ru](mailto:Bovas87@yandex.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

#### История статьи:

Поступила: 14 июля 2023

Рецензирование: 24 июля 2023

Принята к печати: 11 октября 2023

Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Электронно-лучевая наплавка  
 Аддитивные технологии  
 Мартенситная нержавеющая сталь  
 Силы резания  
 Режимы обработки  
 Фрезерование

#### Финансирование

Исследование выполнено при поддержке программы развития ТПУ.

#### Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последние годы большее внимание уделяется аддитивным технологиям печати проволокой. Из-за особенностей печати проволокой твердость заготовки получается существенно выше, чем при традиционной ковке. Увеличение твердости приводит к увеличению силы резания. **Целью работы** является исследование силы резания при фрезеровании образцов из нержавеющей стали 40X13, полученных методом электронно-лучевой наплавки. **Методы исследования.** Образцы получались наплавкой проволоки из мартенситной нержавеющей стали 40X13. В работе исследована микроструктура образцов. Для проведения исследовательской работы была выбрана стандартная методика проведения экспериментов по определению сил резания. Однако для определения сил  $P_z$  и  $P_y$  использовалась четырехзубая ( $z = 4$ ) фреза и ширина фрезерования была менее 2 мм. **В работе исследованы** образцы, полученные с помощью электронно-лучевой наплавки проволокой из стали 40X13. Определены силы резания, возникающие при фрезеровании данных образцов. **Результаты и обсуждение.** Структура полученных электронно-лучевой наплавкой образцов – это мартенсит отпуска. Установлено, что высокоскоростное фрезерование, высокоэффективное фрезерование и встречное фрезерование подходят для обработки таких заготовок. Для обработки тонкостенных заготовок из мартенситной нержавеющей стали после их изготовления методом электронно-лучевой наплавки необходимо использовать попутное фрезерование. Полученные в исследовании режимы резания позволяют снизить температуру режущей кромки, силу резания и изгиб мало жесткой концевой фрезы. Так, в ходе исследования удалось подобрать режимы, позволяющие уменьшить вибрацию системы «станок – приспособление – инструмент – деталь».

**Для цитирования:** Фрезерование заготовок из мартенситной стали 40X13, полученных с помощью аддитивных технологий / Н.В. Мартюшев, В.Н. Козлов, М. Ци, А.Г. Багинский, Ц. Хань, А.С. Бовкун // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 74–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-74-89.

## Введение

Развитие науки и промышленности приводит к появлению и активному развитию новых технологий. Такие технологии появляются и в направлении обработки и изготовления металлических деталей и заготовок. Одни из перспективных современных технологий изготовления деталей – это аддитивные технологии. Адди-

#### \*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](mailto:martjushev@tpu.ru)

тивные технологии имеют не слишком высокую производительность, стоимость изготовления деталей в этом случае также достаточно велика. Одним из направлений развития аддитивных технологий стала печать образцов с помощью наплавки металла. Такая технология существенно снижает время и стоимость изготовления заготовки. Это обусловлено тем, что для печати используется не порошок, а наплавочная проволока, которая в разы дешевле. Однако недостатком такого способа является то, что формируемая поверхность имеет плохое качество, и требуется последующая механическая обработка. Из-за особенности этой технологии, связанной с охлаждением напечатанных деталей, их твердость получается выше, чем при ковке или литье. Особенно это проявляется при изготовлении деталей из мартенситных нержавеющей сталей, которые достаточно недорогие и широко используются в том числе и для наплавки.

При формировании детали методом послойной наплавки на предыдущий слой наносится новый слой. Предыдущий слой повторно нагревается и снова быстро охлаждается. Поскольку критическая скорость охлаждения мартенситных сталей невелика, то формируется мартенситная структура, обладающая высокой твердостью. Исследования, проведенные авторами работ [2, 3], подтверждают это. Послойная наплавка порошка лазером дает различные механические свойства по сечению печатаемых заготовок. Величина зерна, пористость и соответственно механические свойства зависят от направления, в котором производится их измерение. В работе [4] показано, что свойства напечатанных с помощью аддитивных технологий изделий различны в разных направлениях. Авторы также отметили, что это можно частично исправить с помощью термообработки, но потребуются затраты на дополнительную операцию. Аналогичные результаты приведены в [5]. Показывается, что в результате термоциклирования отдельных областей при печати могут возникать внутренние напряжения в печатаемой заготовке. В работе [5] также говорится, что на поверхности образцов 40X13 при SLM образовалась труднообрабатываемая корка (750 HV).

При печати проволокой (WAAM) идет рекристаллизация нижнего слоя во время нанесения на него следующего слоя. При этом формируется

структура, состоящая из вытянутых зерен феррита и мелкозернистого игольчатого мартенсита в матрице в верхнем слое. Эта структура образуется вместо пространственной периодичности мартенситных реек внутри равноосных зерен феррита во внутренних слоях. Содержание мартенсита постепенно увеличивалось по мере удаления от основного металла [6].

Условия работы оборудования во многом определяют процесс формирования заготовки с помощью наплавки проволокой. На него влияют такие параметры, как температура подложки, траектория движения [7] и др. Однако даже при оптимальных режимах все равно получаются различные дефекты структуры материала (упрочнение поверхности, неоднородности и др.). Одной из аддитивных технологий является технология WAAM. При печати заготовок по технологии WAAM также получают заготовки с неоднородными механическими свойствами и структурой. Еще один недостаток WAAM-технологии – плохое качество поверхности. После изготовления заготовки требуется последующая механическая обработка для получения желаемых геометрических допусков и свойств поверхности [8].

При механической обработке таких заготовок следует учитывать эти особенности. Обработка на фрезерном станке заготовок, полученных из нержавеющей сталей методом WAAM, возможна с достаточно высокой производительностью [9], но при этом наблюдается значительный износ инструмента при фрезеровании детали WAAM. Это происходит несмотря на то, что инструмент и параметры фрезерования выбраны на основе рекомендаций производителя по обработке данного материала.

Неоднородная микроструктура, образующаяся в образце, получаемом по технологии WAAM, дает существенное ухудшение его обрабатываемости. Это происходит из-за сложных термических циклов при печати. В работе [10] продемонстрированы сложности, возникающие при фрезеровании концевой фрезой из  $Al_2O_3/Si_3N_4$  (сиалон) сплава  $Ti_6Al_4V$ . Авторы работы отметили более значительный износ инструмента при обработке WAAM-образцов в сравнении с коваными и литыми образцами.

Снизить износ и повысить стойкость инструмента можно за счет изменения скорости реза-

ния и подачи [11, 12]. Можно также использовать криогенное охлаждение режущего инструмента.

Другой способ снижения износа инструмента – это подбор режимов печати, формирующих нужные поверхностные свойства. Чтобы преодолеть неоднородность печатаемой заготовки по твердости, была разработана и проверена методология агрегирования данных микротвердости в отдельных сборках [13, 14]. Совмещение различных технологий аддитивной печати дает возможность получать более однородную структуру. Однако в целом исследователи отмечают [15], что при обработке напечатанных заготовок идет увеличение сил резания в сравнении с заготовками, полученными традиционными методами. Авторы [16] указывают, что заготовки, полученные методами аддитивных технологий, дают совершенно различные силы резания при одних и тех же режимах обработки.

Для обработки деталей из стали 316L, полученных методами лазерных аддитивных технологий (LAM), рекомендуется попутное фрезерование [17, 18]. Оно дает лучшее качество поверхности по шероховатости по сравнению со встречным. Снизить износ инструмента и повысить производительность обработки можно за счет использования ультразвукового вибрационного фрезерования при попутном фрезеровании [19–23]. В настоящее время также ведутся работы по совмещению аддитивных и субтрактивных технологий на одном оборудовании [24]. Это позволяет повысить точность изготовления, сократить время работы и уменьшить износ инструмента.

Важность определения оптимальных режимов обработки заготовок, полученных аддитивными методами печати проволокой, отмечается в работе [25]. Авторы говорят о том, что стандартные режимы обработки не дают оптимального результата. В целом также авторами [25–28] отмечается, что различное положение заготовки при 3D-печати формирует различные свойства. Вертикально изготовленные заготовки охлаждаются медленнее, чем горизонтально расположенные. В итоге в зависимости от расположения заготовок при печати их свойства будут различны, что окажет влияние на режимы обработки. Поэтому при назначении режимов субтрактивной обработки важно знать особенности изготовления заготовки: это будет напрямую влиять

на качество обработки и износ инструмента. Особенно это важно для деталей, изготовленных методом электронно-лучевой печати (EBW). Печать заготовок методом WAAM более массовая в силу своей дешевизны. EBW-методом изготавливают более ответственные детали, такие детали должны обладать более высокой точностью. Поэтому для заготовок, изготовленных методом EBW, крайне важно изучить особенности последующей ректративной обработки. Анализ литературы показывает, что работы, посвященные свойствам различно ориентированных напечатанных образцов, есть. Однако работ, показывающих, насколько изменения свойств различно ориентированных напечатанных образцов влияют на режимы субтрактивной обработки, практически нет. Работы, посвященные обработке заготовок, напечатанных методом EBW, практически отсутствуют.

Работ, посвященных субтрактивной обработке заготовок, полученных электронно-лучевой печатью, очень мало. Поэтому тема подбора оптимальных режимов обработки заготовок, изготовленных методами WAAM (наплавки проволоки), весьма актуальна.

**Цель этой работы** – путем экспериментов определить закономерности изменения сил при фрезерной обработке заготовок из нержавеющей стали 40X13, изготовленных электронно-лучевой наплавкой.

## Материалы и методики

Для проведения исследований по фрезерной обработке были получены образцы с помощью технологии электронно-лучевой наплавки проволоки: напечатаны 10 образцов для проведения исследований. Пять образцов было использовано для попутного фрезерования и еще пять образцов – для встречного фрезерования. Размеры образцов составляли 14×70×15 мм (высота × ширина × длина). Исследуемые образцы были напечатаны с помощью стальной проволоки, химический состав которой приведен в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

### Химический состав стали 40X13

#### The chemical composition of martensitic steel

C	Mn	Si	Ni	Cr	P	S	Fe
0,40	0,49	0,54	0,50	13,1	0,020	0,016	остальное

### Изготовление образцов с помощью электронно-лучевой установки

Образцы были напечатаны на электронно-лучевой установке (ЭЛС) наплавки проволокой. Установка разработана и изготовлена в Томском политехническом университете (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид рабочей камеры установки электронно-лучевой наплавки проволокой

Fig. 1. General view of the working chamber of the electron-beam wire surfacing installation

Ускоряющее напряжение установки ЭЛС составляет 40 кВ и остается неизменным. Диапазон изменения тока находится в пределах 0–200 мА. Исходным материалом для получения заготовки методом ЭЛС является стальная проволока марки 40Х13 диаметром 1,2 мм. Общая схема печати образцов приведена на рис. 2.

При печати образцов использовали следующие режимы:

- круговая развертка луча 3,0–5,0 мм;
- угол подачи для проволоки 45,0°;
- ток луча 30 мА;
- скорость подачи проволоки 700 мм/мин.

При печати в качестве материала подложки использовался тот же материал, что и для проволоки, – сталь 40Х13. Печать осуществлялась в вакууме при давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  Па.

### Исследование микроструктуры полученных образцов

Травление микроструктуры осуществляли с помощью травителя, представляющего собой смесь концентрированных азотной  $\text{HNO}_3$

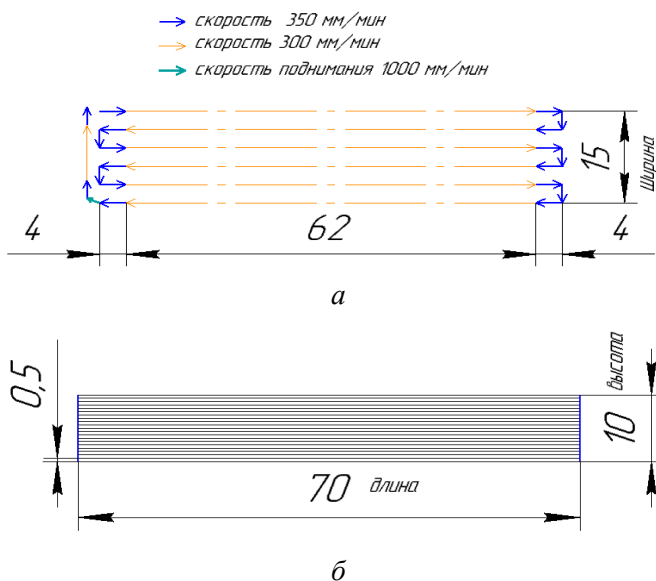


Рис. 2. Схема печати образца:

*a* – схема печати одного горизонтального слоя; *б* – схема печати в вертикальном направлении

Fig. 2. Scheme for printing a specimen:

*a* – pattern for printing one horizontal layer; *б* – print pattern in the vertical direction

(67 масс.%) и соляной  $\text{HCl}$  (33 масс.%) кислот. Соотношение кислот 1:3 по объему. Микроструктуру исследовали с помощью микроскопа ММР-1 (БИОМЕД).

### Исследование сил резания при фрезеровании

Для фрезерования образцов использовался станок с ЧПУ CONCEPTMill 155 (EMCO). Силы резания определяли с помощью динамометра Kistler 9257B (Швейцария). Направления измеряемых сил  $F_x$ ,  $F_y$  и  $F_z$ , отображаемых на мониторе динамометра Kistler, соответствуют при фрезеровании силам  $P_h$ ,  $P_v$  и  $P_x$ . Кроме того, силы  $F_z$  и  $F_y$  приблизительно соответствуют тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  силам при врезании и при выходе зуба из контакта, если  $t$  равно половине диаметра фрезы.

Для проведения исследовательской работы была выбрана стандартная методика проведения экспериментов по определению сил резания. Однако для определения сил  $P_z$  и  $P_y$  мы делали ряд отступлений от этой методики. Использовалась четырехзубая ( $z = 4$ ) фреза, и ширина фрезерования была менее 2 мм. Глубина фрезерования  $t$  была немного меньше (на 0,2 мм) половины диаметра фрезы  $d$  ( $t \approx 0,5d - 0,2$ ). Такое отступление от стандартного подхода позволило рассчитать



составляющие нормальной  $N$  и касательной  $F$  сил на передней поверхности зуба фрезы с помощью определенных сил  $P_z$  и  $P_y$ . При этом учитывался передний угол.

Для анализа данных использовали программный продукт DynoWare. Чувствительность динамометра 7,5 Н, погрешность его измерения  $\pm 0,005$  %. Разброс при измерении сил резания составлял не более 15 %. Такая погрешность обусловлена износом фрезы. При наличии износа необходимо сделать перенастройку. Однако очень сложно обеспечить точность настройки на требуемую ширину и глубину фрезерования даже при небольшом износе фрезы в процессе экспериментов. В качестве инструмента были выбраны твердосплавные концевые фрезы производства компания GESAC (Китай). Твердый сплав состоял в основном из карбидов вольфрама

и кобальтовой связки (~8 %). Их параметры приведены в табл. 2. Задний угол  $5^\circ$ , передний угол  $7^\circ$ . Использовались фрезы с покрытием, характеристики которого приведены в табл. 3. Выбор фрез с таким покрытием обусловлен условиями обработки. В экспериментах мы использовали встречное и попутное сухое фрезерование. Попутное фрезерование вели четырехзубой фрезой  $d = 8$  мм при ширине фрезерования  $B = 2$  мм, частоте вращения шпинделя  $n = 500$  об/мин, подаче  $s_m = 104$  мм/мин. Большое значение подачи выбрано для того, чтобы испытать выбранный инструмент на предельных режимах работы. Встречное фрезерование вели также четырехзубой фрезой  $d = 8$  мм при  $B = 2$  мм,  $n = 500$  об/мин,  $s_m = 28$  мм/мин. При выборе режимов резания исходили из опыта работ, выполненных авторами [28].

Таблица 2

Table 2

**Основные параметры используемых фрез**  
**The main parameters of the milling cutters used**

Заводская маркировка	Покрытие	Диаметр, мм	Угол винтовой канавки, $\omega$ , град	Число зубьев, $z$
UP210-S4-08020	AlCrSiN	8	35	4

Таблица 3

Table 3

**Основные параметры покрытия используемых фрез**  
**The main parameters of the coating of the milling cutters used**

Покрытие	HV0.05	$\mu$	$T$
AlCrSiN	3300	0,4	1100

## Результаты и их обсуждение

### *Получение образцов электронно-лучевой наплавкой и исследование их микроструктуры*

На первом этапе работы мы изготовили образцы для последующей механической обработки. Так как технология печати образцов с помощью электронного луча наплавкой проволоки

является достаточно новой, то практически нет никаких стандартных режимов изготовления образцов. Режимы печати будут в основном зависеть от печатаемого материала и геометрических размеров образцов. Более подробно технологию подбора режимов печати для нержавеющей стали 40X13 мы привели в работе [28]. Был сделан небольшой разброс значения тока луча для того,

чтобы определить оптимальные режимы печати. При проведении экспериментов использовалось шесть различных значений тока луча. Значение, при котором получался наиболее качественный образец, обладающий наименьшим количеством дефектов и гладкой поверхностью, использовалось затем для получения оставшихся образцов.

### ***Изготовление образцов с помощью электронно-лучевой наплавки***

В этой работе было напечатано пять экспериментальных образцов с помощью электронно-лучевой технологии 3D-печати проволокой. В результате предварительных работ была определена оптимальная величина тока луча: 30 мА (рис. 3).

Первый печатаемый слой имеет самую высокую скорость охлаждения. Если ток луча слишком велик, то это приводит к проплавлению не только проволоки, но и материала подложки. В результате появляется впадина на границе печатаемого образца. Печать следующего слоя будет невозможна. По мере уменьшения тока луча длина траектории печати увеличивается. С возрастанием количества напечатанных слоев снижается скорость охлаждения и идет увеличение общей температуры образца. Исходя из этого, для изготовления образцов были определены



Рис. 3. Образец, полученный с помощью электронно-лучевой наплавки проволокой из стали 40X13

Fig. 3. A specimen obtained by electron-beam surfacing with a 0.4 C-13 Cr steel wire

оптимальные режимы печати, при которых можно было формировать заготовку слой за слоем: ток луча 30 мА и скорость подачи проволоки 700 мм/мин [28].

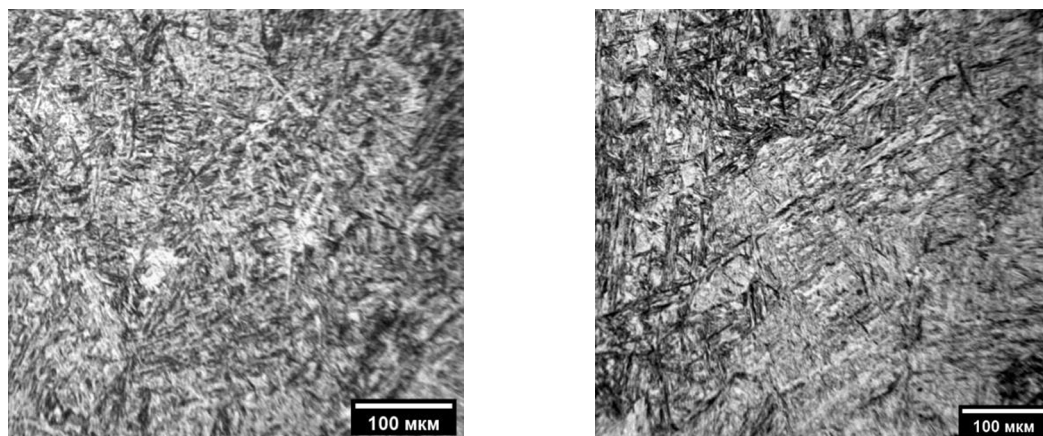
### ***Исследование микроструктуры напечатанных образцов***

Традиционные методы формирования заготовок (ковка, литье) дают полностью мартенситную структуру для стали 40X13. При использовании аддитивных технологий в такой стали могут образовываться аустенит и дельта-феррит. В ходе нашей работы мы исследовали микроструктуру сталей.

Как показано на рис. 4, напечатанные образцы имеют плотную структуру. На межслоевых границах отсутствуют трещины, и граница расплавленной ванны также отсутствует. Микроструктура изготовленных образцов аналогична микроструктуре стали 40X13 после закалки и низкого отпуска [29–33]. Мартенсит имеет игольчатое строение. Такое поведение объясняется высокой скоростью охлаждения во время затвердевания при электронно-лучевом аддитивном производстве, что облегчает фазовое превращение аустенита в мартенсит. Эти мартенситные иглы со случайной ориентацией значительно меньше, чем мартенситные иглы, образующиеся при литье и закалке нержавеющей стали 40X13 [26, 27]. При аддитивной печати образца теплота, идущая от нанесенного нового слоя, оказывает влияние на ранее напечатанные слои. Нижележащие слои под печатаемым слоем нагреваются выше температуры аустенизации. Ранее образовавшийся мартенсит превращается в аустенит, и после охлаждения снова образуется остаточный аустенит и мартенсит. Однако если температура недостаточна и ниже температуры аустенизации, то идет процесс отпуска мартенсита, остаточный аустенит снова превращается в мартенсит.

### ***Исследование сил резания при механической обработке образцов***

На третьем этапе нашей работы мы провели исследование сил резания, возникающих при фрезеровании напечатанных образцов. При обработке напечатанных образцов наибольшее внимание в данной работе уделялось составляющим силам  $P_h$  и  $P_v$  (рис. 5, 6). Это вызвано тем,



*a*

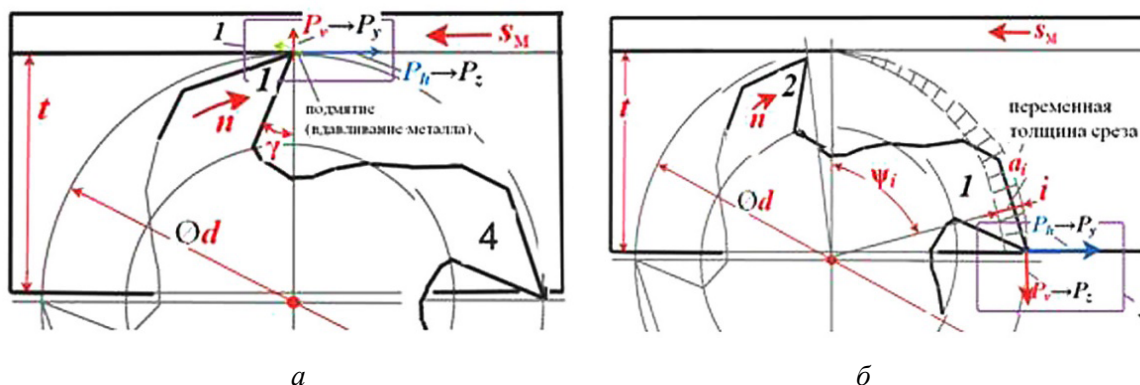
*б*

Рис. 4. Микроструктура образцов:

*a* – область возле края образца; *б* – центральная часть образца

Fig. 4. Microstructure of the specimens:

*a* – the area near the edge of the specimen; *б* – the central part of the specimen



*a*

*б*

Рис. 5. Схема направления составляющих силы резания при несимметричном встречном концевом фрезеровании четырехзубой концевой фрезой диаметром  $d = 8$  мм при глубине фрезерования  $t = d/2 - 0,2 = 3,8$  мм:

*a* – при врезании зуба № 1 (предыдущий зуб № 4 уже вышел из контакта); *б* – при выходе зуба № 1 из контакта с заготовкой (следующий зуб № 2 еще не вошел в контакт с заготовкой)

Fig. 5. The direction scheme of the components of the cutting force in asymmetric up end milling with a four-tooth end mill with a diameter of  $d = 8$  mm at a milling depth of  $t = d/2 - 0.2$  mm = 3.8 mm:

*a* – when tooth No.1 enters the workpiece (the previous tooth No.4 is already out of contact); *б* – when tooth No.1 leaves contact with the workpiece (the next tooth No.2 has not yet come into contact with the workpiece)

что сила  $P_x$  невелика относительно остальных сил. Она имеет направление вдоль оси фрезы – это направление самой высокой жесткости фрезы (рис. 6). Радиальное направление – направление самой низкой жесткости для концевой фрезы. Исходя из этого, действующая радиально к оси фрезы сила  $P_y$  приводит к появлению вибрации.

В ходе исследования нами были построены графики изменения сил резания при фрезерова-

нии четырехзубой фрезой для процессов встречного и попутного фрезерования.

### Процесс встречного фрезерования

При встречном фрезеровании четырехзубой фрезой диаметром 8 мм при  $t = 3,8$  мм изменение составляющих сил резания от времени  $\tau$  (с) представлено на рис. 7. Диаметр фрезы немного менее 4 мм был взят для гарантии, что следующий зуб еще не начал резание. На графике по-



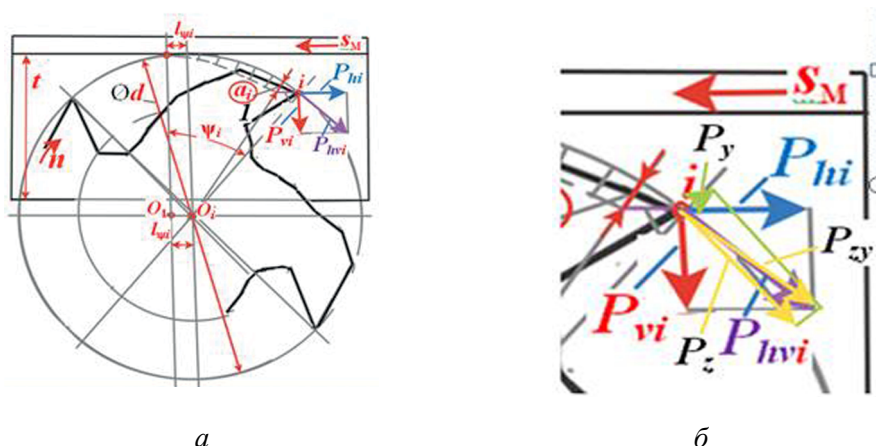


Рис. 6. Схема направления составляющих силы резания при несимметричном встречном концевом фрезеровании на виде сверху:

*a* – положение зуба фрезы при центральном угле  $\psi \approx 50^\circ$  от точки входа в контакт до рассматриваемого положения; *б* – крупно схема действия составляющих  $P_{vi}$  и  $P_{hi}$ , а также  $P_z$  и  $P_y$  и их результирующих  $P_{hvi}$  и  $P_{zy}$  при  $\psi \approx 50^\circ$

Fig. 6. The direction scheme of the components of the cutting force in asymmetric up end milling in the top view:

*a* – the position of the cutter tooth at a central angle  $\psi \approx 50^\circ$  from the point of contact to the considered position; *б* – large diagram of the action of the components  $P_{vi}$  and  $P_{hi}$ , as well as  $P_z$  and  $P_y$  and its resulting  $P_{hvi}$  and  $P_{zy}$  at  $\psi \approx 50^\circ$

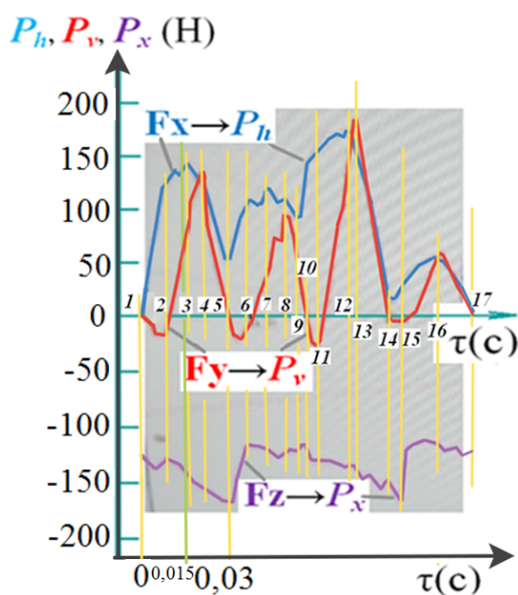


Рис. 7. Графики изменения сил при фрезеровании при повороте острой фрезы на один оборот. Встречное фрезерование четырехзубой фрезой  $d = 8$  мм,  $t = 3,8$  мм,  $B = 2$  мм,  $n = 500$  об/мин,  $s_M = 28$  мм/мин, образец № 1 – твердый сплав

Fig. 7. Graphs of force changes during milling when turning a sharp cutter for one revolution. Up milling with a 4-tooth cutter  $d = 8$  mm,  $t = 3.8$  mm,  $B = 2$  mm,  $n = 500$  rpm,  $s_M = 28$  mm/min, specimen No.1 – carbide

казаны силы, возникающие при одном полном обороте фрезы. На кривых основных составляющих сил резания  $P_h$  и  $P_v$  видны четыре четких пика – они соответствуют работе каждого из четырех зубьев фрезы. Рост силы происходит при врезании зуба в заготовку, падение силы – при выходе зуба из зоны резания.

Осевая составляющая  $P_x$  изменяется незначительно в течение всего цикла (рис. 7, диапазон между числами 1 и 5), так как по торцевой части в контакте с заготовкой находится практически сразу три зуба при четырехзубой фрезе и глубине фрезерования  $t \approx d/2$  (см. рис. 5, *a*, *б*). При уменьшении глубины фрезерования  $t < 0,2d$ , т. е. если глубина фрезерования  $t$  будет меньше глубины стружечной канавки фрезы  $h$ , в постоянном контакте с заготовкой будет находиться только один зуб. Это вызовет большие изменения величины составляющей  $P_x$  при повороте фрезы.

Время работы одного зуба при  $t = d/2$  и четырехзубой фрезе ( $z = 4$ ):  $\tau_{\text{зуба}} = 60/4n$  (с). На графике изменения величины составляющих  $P_h$ ,  $P_v$  и  $P_x$  силы резания (рис. 7) видно, что происходит несинхронное изменение их величины.

При анализе изменения сил фрезерования необходимо иметь в виду, что динамометр Kistler установлен поперёк фрезерного стола (перпендикулярно продольной подаче стола  $s_M$ ),



а заготовка установлена длинной частью поперек динамометра, т. е. параллельно направлению продольной подачи стола  $s_m$ . Заготовка находится за фрезой, если смотреть со стороны оператора.

При врезании зуба в заготовку (см. рис. 7, диапазон между числами 1 и 2) зуб фрезы своей округленной режущей кромкой отталкивает заготовку от оси вращения фрезы, т. е. появляется составляющая сила  $P_{v \text{ врез}}$  с отрицательным знаком (в программе обработки сигналов с датчиков динамометра Kistler «защито», что положительный знак у силы  $F_y$  ( $P_v$  при фрезеровании) будет при действии силы в сторону оператора, т. е. как при токарной обработке).

В это же время составляющая сила  $P_{h \text{ врез}}$  действует с положительным знаком, т. е. зуб фрезы толкает заготовку в направлении, противоположном направлению встречной подачи  $s_m$  (рис. 8). Положительный знак у силы  $F_x$  ( $P_h$  при фрезеровании) на мониторе будет при действии силы слева направо, т. е. как при токарной обработке.

При дальнейшем повороте зуба (см. рис. 7, диапазон между числами 2 и 3) сила  $P_v$  действует уже в положительном направлении оси  $OY$ , т. е. зуб фрезы притягивает заготовку к оси вращения фрезы из-за положительного главного переднего угла  $\gamma$  (рис. 8, но показано положение фрезы после заготовки на виде сверху). Составляющая сила  $P_h$  непрерывно увеличивается по мере поворота зуба фрезы, так как увеличивает-

ся толщина среза  $a_i = s_z \sin \psi_i$  (см. рис. 7, диапазон между числами 2 и 3).

По мере поворота зуба фрезы на угол  $\psi$  не только увеличивается толщина среза  $a$ , но и происходит изменение направления составляющих  $P_z$  и  $P_y$  силы резания (рис. 9, но показано положение фрезы после заготовки на виде сверху). При увеличении толщины среза  $a$  сила  $P_z$  увеличивается более интенсивно, чем сила  $P_y$ , так как эта составляющая «отвечает» за срез стружки. Сила  $P_y$  при увеличении толщины среза практически не должна изменяться при остром режущем клине из-за малого коэффициента трения на передней поверхности зуба фрезы. Изменение направления действия сил  $P_z$  и  $P_y$  при повороте фрезы на угол  $\psi$  приводит к тому, что составляющая  $P_v$  увеличивается, а составляющая  $P_h$ , наоборот, начинает уменьшаться за счет поворота наибольшей силы  $P_z$  в сторону оси  $OY$ , т. е. она больше увеличивает силу  $P_v$ , а не  $P_h$  (см. рис. 7, диапазон между числами 3 и 4).

Дальнейший поворот фрезы приводит к уменьшению толщины среза  $a_i$  в период выхода зуба из контакта с заготовкой, что вызывает уменьшение составляющих  $P_z$  и  $P_y$ , а значит, и составляющих  $P_h$  и  $P_v$  (см. рис. 7, диапазон между числами 4 и 5). Уменьшение указанных составляющих при этом происходит не так быстро, как уменьшение толщины среза в конце реза зубом, поскольку упругая деформация системы СПИД (станок – приспособление – ин-

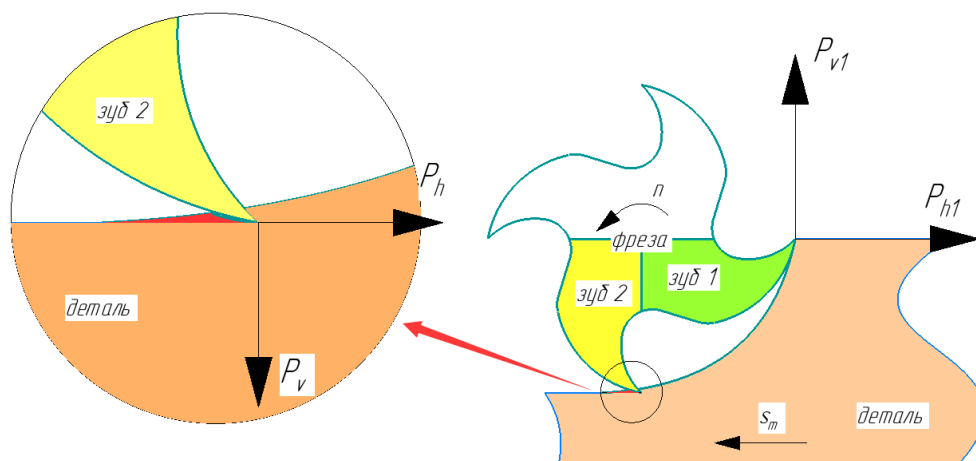


Рис. 8. Составляющие силы, действующие на деталь при встречном фрезеровании при врезании с острой фрезой (показано положение фрезы после заготовки на виде сверху)

Fig. 8. Component forces acting on the workpiece during up milling with a sharp cutter (the position of the cutter after the workpiece is shown in the top view)

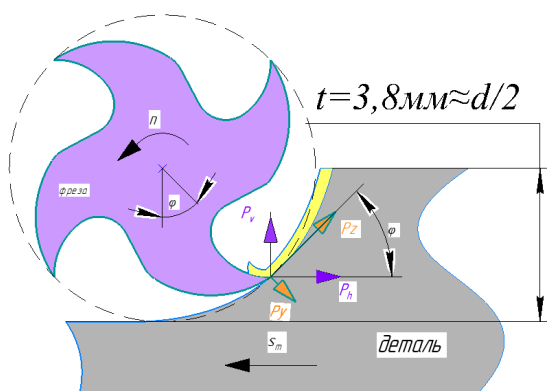


Рис. 9. Составляющие силы ( $P_y$ ,  $P_z$ ), полученные после разложения силы при фрезеровании ( $P_h$ ,  $P_v$ ) на направление к оси фрезы и тангенциальное направление, т. е. касательно к направлению вращения фрезы (показано положение фрезы после заготовки на виде сверху)

Fig. 9. Force components ( $P_y$ ,  $P_z$ ) obtained after decomposing the milling force ( $P_h$ ,  $P_v$ ) into a direction towards the cutter axis and a tangential direction, i.e. tangent to the direction of rotation of the cutter (the position of the cutter after the workpiece is shown in top view)

струмент – деталь) не позволяет сделать это так резко, как теоретически ожидается. Мы считаем, что с увеличением жёсткости системы СПИД, и прежде всего с увеличением жесткости концевой фрезы как самого нежесткого элемента, будет происходить более быстрое уменьшение сил в конце работы зуба фрезы.

Отрицательная величина знака силы  $P_x$  ( $P_x = -120 \dots -170$  Н) свидетельствует о стремлении фрезы поднять заготовку, что связано с положительным углом наклона зубьев фрезы  $\omega = 40^\circ$ .

Увеличение силы  $P_x$  в отрицательную сторону в диапазоне цифр 2–5 (см. рис. 7) связано с увеличением толщины среза при повороте фрезы, а уменьшение в диапазоне цифр 5–6 – с уменьшением толщины среза в конце цикла срезания припуска рассматриваемым зубом.

При дальнейшем повороте фрезы следующий зуб фрезы начинает врезаться в заготовку, поэтому цикл изменения составляющих сил повторяется (см. рис. 7, диапазон между числами 5 и 9).

### Процесс попутного фрезерования

При врезании зуба в заготовку (рис. 10, диапазон между числами 1 и 2) толщина среза  $a$  быстро увеличивается до максимального значе-

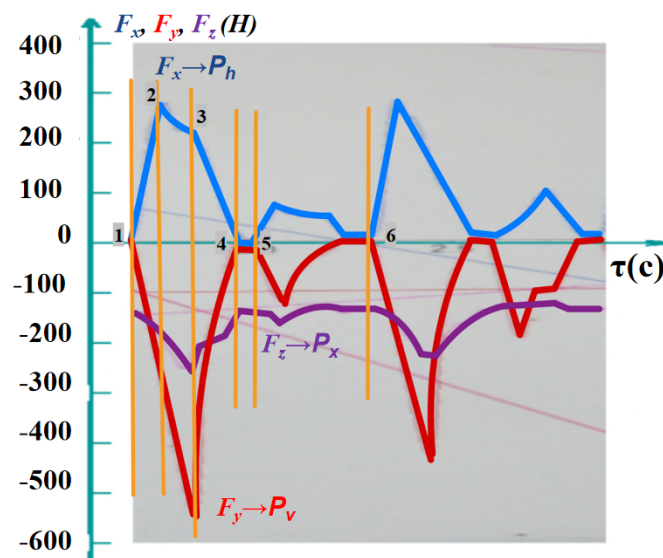


Рис. 10. Графики изменения сил при фрезеровании при повороте острой фрезы на один оборот. Попутное фрезерование четырехзубой фрезой  $d = 8$  мм,  $t = 4$  мм,  $B = 2$  мм,  $n = 500$  об/мин,  $s_m = 104$  мм/мин, образец № 1 – твердый сплав

Fig. 10. Graphs of force changes during milling when turning a sharp cutter for one revolution. Down milling with a 4-tooth cutter  $d = 8$  mm,  $t = 4$  mm,  $B = 2$  mm,  $n = 500$  rpm,  $s_m = 104$  mm/min, specimen No. 1 – carbide

ния  $a_{\max}$ , поэтому составляющая сила  $P_h$  быстро увеличивается до максимального значения, и  $P_v$  так же быстро увеличивается в отрицательную сторону направления оси  $OY$  динамометра (фреза округленной режущей кромкой и своей задней поверхностью отталкивает заготовку от оси фрезы).

Поскольку подача  $s_m = 104$  мм/мин очень велика, т. е. толщина среза  $a$  большая, то сила  $P_y$ , действующая в радиальном направлении к оси фрезы, имеет в своей составляющей и нормальную нагрузку со стороны задней поверхности зуба в момент врезания. Под действием сил  $P_y$  и  $P_z$  составляющая  $P_v$  продолжает увеличиваться в отрицательную сторону из-за большой подачи и перемещения зуба фрезы на продолжение резания. Поскольку толщина среза при попутном фрезеровании уменьшается, то увеличивается поднятие металла под режущую кромку, но не так интенсивно, как при встречном фрезеровании из-за наличия еще стружки на передней поверхности зуба фрезы. Составляющая  $P_h$  в это время, наоборот, начинает уменьшаться за счет уменьшения толщины среза и соответственно уменьшения силы  $P_z$ , и к тому же происходит

поворот ее направления в сторону оси  $OY$ , т. е. она больше действует на силу  $P_v$ , а не на  $P_h$  (см. рис. 10, диапазон между числами 2 и 3).

Дальнейший поворот фрезы приводит к дальнейшему уменьшению толщины среза  $a$  до нуля, что вызывает уменьшение составляющих  $P_z$  и  $P_v$ , а значит, и составляющих  $P_h$  и  $P_v$  (рис. 10, диапазон между числами 3 и 4).

Из-за упругой деформации системы СПИД под действием силы  $P_v$  фреза отталкивается от обработанной поверхности, из-за чего глубина резания не достигает заданного значения. В свою очередь, это приводит к сокращению времени фрезерования одним зубом заготовки. На рис. 10 в диапазоне между числами 4 и 5 силы равны нулю.

Так же как изменение силы  $P_x$  при встречном фрезеровании,  $P_x$  при попутном фрезеровании колеблется вверх и вниз в зависимости от изменения толщины резания  $a$ , и эти изменения невелики. Отрицательная величина знака силы  $P_x$  свидетельствует о стремлении фрезы поднять заготовку, что связано с положительным углом наклона зубьев фрезы  $\omega = 40^\circ$ .

При дальнейшем повороте фрезы следующий зуб фрезы начинает врезаться в заготовку, поэтому цикл изменения составляющих сил повторяется (см. рис. 10, диапазон между числами 5 и 6). Однако из-за упругой деформации системы СПИД и небольшого радиального биения зубьев максимальная сила каждого цикла не одинакова.

В результате проведенных экспериментальных работ мы определили силы, действующие на инструмент при обработке образцов из жаропрочной стали, полученной методом EBW проволокой. Были также получены закономерности изменения сил резания в процессе резания одним зубом. К важным результатам относится определение изменения направления боковой составляющей силы резания  $P_v$ . Поскольку наличие зазора в винтовой паре поперечной подачи станка приводит к возникновению вибраций, то его необходимо уменьшить до минимума. Знание силы подачи  $P_h$ , полученной по результатам проведенных испытаний, позволяет рассчитать необходимую силу закрепления заготовки, что особенно важно при малой жесткости заготовки. Эти результаты важны для производственных предприятий при обработке заготовок, полученных методом EBW проволокой.

## Закключение

Исследование сил резания выполнялось фрезерованием образцов прямоугольной формы, изготовленных методом электронно-лучевой наплавки мартенситной нержавеющей стали. На основе экспериментов были сделаны следующие основные выводы.

1. Структура напечатанных электронно-лучевой наплавкой образцов соответствует мартенситу отпуса.

2. Величина результирующей силы резания  $P_{hv}$  при попутном и встречном фрезеровании практически одинакова. Но сила резания в направлении подачи  $P_h$  при встречном фрезеровании существенно больше, чем при попутном, а боковая сила  $P_v$  при встречном фрезеровании резания существенно меньше, чем при попутном. Исходя из этого, при обработке тонкостенных деталей следует использовать попутное фрезерование.

3. В работе с помощью небольшого отступления от стандартной методики измерения сил резания были получены зависимости изменения сил  $P_z$  и  $P_v$  в процессе работы фрезы. Эти данные позволяют при известных физических составляющих на передней поверхности зуба строить эпюры контактных напряжений. Стандартная методика не дает таких данных. Это особенно важно для проведения работ по проектированию нового инструмента и позволяет вести расчет инструмента на прочность режущего клина. Измененную методику мы в своей работе опробовали на стали 40X13. Были определены силы  $P_z$  и  $P_v$ , действующие на зуб фрезы. В качестве продолжения данной работы планируется определить силы  $P_z$  и  $P_v$  для титановых сплавов, полученных методом EBW наплавки проволоки.

## 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. – 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. JCM 2020*. – 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  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V / J. Dang, H. Zhang, W. Ming, Q. 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. Morandau, F. Chalon, 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*. – 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. Montevecchi, N. Grossi, H. Takagi, A. Scippa, H. Sasahara, G. Campatelli // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – P. 476–479.
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: 10.1016/j.precisioneng.2019.11.002.
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. – 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.Yu. Skeebe, B.N. Absadykov // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – 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 B.W.H., 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. – 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 коррозионностойких сталей // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 226–235. – DOI: 10.18721/JEST.230123.
31. Mathematical modeling and multi-criteria optimization of design parameters for the gyratory crusher / V.P. Kondrakhin, N.V. Martyushev, R.V. Klyuev, S.N. Sorokova, E.A. Efremenko, D.V. Valuev, Q. Mengxu // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11. – P. 2345. – DOI: 10.3390/math11102345.
32. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails / K. Yelemessov, D. Baskanbayeva, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebe, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1043. – DOI: 10.3390/met13061043.
33. Capabilities of laser printers with different power / R. Ahmetshin, V. Fedorov, K. Kostikov, N. Martyushev, V.A. Ovchinnikov, A. Razin, A. Yakovlev // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 712. – P. 246–250. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.246.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 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>).



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)











### Milling martensitic steel blanks obtained using additive technologies





Nikita Martyshev<sup>1, a, \*</sup>, Victor Kozlov<sup>1, b</sup>, Mengxu Qi<sup>1, c</sup>, Andrey Baginskiy<sup>1, d</sup>,  
 Zeli Han<sup>1, e</sup>, Aleksandr Bovkun<sup>2, f</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  [martjushev@tpu.ru](mailto:martjushev@tpu.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>,  [kozlov-viktor@bk.ru](mailto:kozlov-viktor@bk.ru);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3738-0193>,  [mensyuy1@tpu.ru](mailto:mensyuy1@tpu.ru); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1544-6406>,  [bagin@tpu.ru](mailto:bagin@tpu.ru);

<sup>e</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6502-6541>,  [hanelizy@gmail.com](mailto:hanelizy@gmail.com); <sup>f</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0623-4284>,  [Bovas87@yandex.ru](mailto:Bovas87@yandex.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 14 July 2023

Revised: 24 July 2023

Accepted: 11 October 2023

Available online: 15 December 2023

##### Keywords:

Electron-beam surfacing

Additive technologies

Martensitic stainless steel

Cutting forces

Processing modes

Milling

##### Funding

This research was supported by TPU development program.

##### Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

#### ABSTRACT

**Introduction.** In recent years, more attention has been paid to additive wire printing technologies. Due to the peculiarities of printing with wire, the hardness of the workpiece is significantly higher than with traditional forging. An increase in hardness leads to an increase in cutting force. **The aim of the work** is to study the cutting force during milling workpieces of stainless steel 0.4 C-13 Cr obtained by electron-beam surfacing. **Research Methods** The specimens were obtained by surfacing wire from martensitic stainless steel 0.4 C-13 Cr. The microstructure of the specimens was studied in this work. The main attention was paid to the study of cutting forces during the processing of specimens. The work **investigate** specimens obtained by electron-beam surfacing with 0.4 C-13 Cr steel wire. The cutting forces arising during milling of these specimens are determined. To carry out the research work, a standard methodology for conducting experiments to determine cutting forces was chosen. However, to determine the forces  $P_z$  and  $P_y$ , a four-flute ( $z = 4$ ) milling cutter was used and the milling width was less than 2 mm. **Results and discussion.** The structure of the specimens obtained by electron-beam surfacing is tempered martensite. It is established that high-speed milling, high-efficiency milling and conventional milling are suitable for processing such workpieces. For processing thin-walled workpieces made of martensitic stainless steel after its manufacture by the method of electron-beam surfacing, it is necessary to use only carbide cutters with a diameter of at least 12 mm. The cutting modes obtained in the study make it possible to reduce the temperature of the cutting edge, cutting force and bending of a low-rigid end mill. So, in the course of the study, it was possible to select modes that reduce the vibration of the machine-device-tool-part system.

**For citation:** Martyshev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Baginskiy A.G., Han Z., Bovkun A.S. Milling martensitic steel blanks obtained using additive technologies. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 74–89. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-74-89. (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.
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*. Springer, 2020, pp. 435–448. DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6\_41.

##### \* 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](mailto:martjushev@tpu.ru)

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. JCM 2020*. 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 Yu., 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*. Springer, 2020, pp. 263–272. DOI: 10.1007/978-981-15-0054-1\_27.
15. Montevocchi 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.
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: 10.1016/j.precisioneng.2019.11.002.
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, 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.Yu., Absadykov B.N. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy. *Materials*, 2022, vol. 15, 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, p. 3490. DOI: 10.3390/ma16093490.
24. Cahoon B.W.H., 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 Zarchi 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, p. 4529. DOI: 10.3390/ma16134529.
29. Shlyakhova G.V., Bochkareva A.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Martusevich E.V. 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. (In Russian).
30. Haidorov A.D., Yunusov F.A. Vakuumnaya termicheskaya obrabotka vysokolegirovannykh korroziionnostoikikh stalei [Vacuum heat treatment of high alloy corrosion-resistant steels]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta = 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., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Sorokova S.N., Efremkov 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.
32. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Gozbenko V.E., Karlina A.I. Change in the properties of rail steels during operation and reutilization of rails. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 1043. DOI: 10.3390/met13061043.
33. Ahmetshin R., Fedorov V., Kostikov K., Martyushev N., Ovchinnikov V.A., Razin A., Yakovlev A. Capabilities of laser printers with different power. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 246–250. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.246.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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>).