



Определение оптимальных параметров фрезерования нержавеющей стали 12Х18Н10Т, изготовленной методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства

Мэнсюй Ци^{1, a}, Сергей Панин^{2, b, *}, Дмитрий Степанов^{2, c}, Михаил Бурков^{2, d}, Цинжун Чжан^{1, e}

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

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0003-3738-0193>, mensuy1@tpu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7623-7360>, svp@ispms.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-2558-7613>, sdu@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-3337-6579>, burkovispms@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0002-7820-1227>, cinzhun1@tpu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

История статьи:

Поступила: 08 сентября 2025

Рецензирование: 01 октября 2025

Принята к печати: 29 октября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

Сталь 12Х18Н10Т

Электронно-лучевое аддитивное производство

Фрезерование

Метод множественной регрессии

Нейросетевое моделирование

Финансирование

Исследования выполнены в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2023-456.

Благодарности

При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» НГТУ. Авторы благодарят Ю.В. Кушнарева за помощь в изготовлении образцов стали 12Х18Н10Т на опытной установке ИФПМ СО РАН.

Для цитирования: Определение оптимальных параметров фрезерования нержавеющей стали 12Х18Н10Т, изготовленной методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства / М. Ци, С.В. Панин, Д.Ю. Степанов, М.В. Бурков, Ц. Чжан // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 116–130. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-116-130.

Введение

Традиционно выделяют пять классов нержавеющей стали: аустенитная, ферритная, мартенситная, дуплексная и дисперсионно-твердящая. Аустенитные стали представляют собой самую крупную группу нержавеющих сталей;

*Адрес для переписки

Панин Сергей Викторович, д.т.н., профессор

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр-т Академический 2/4,
634055, г. Томск, Россия

Тел.: 8 (3822) 286-904, e-mail: svp@ispms.ru

они производятся в большем объеме, нежели все остальные группы [1]. Кроме того, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т (аналог AISI 321) обладает превосходной стойкостью к межкристаллитной коррозии и стабильностью свойств при повышенных температурах. По совокупности указанных причин аустенитная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т часто используется в жестких условиях эксплуатации, таких как повышенная температура, высокое давление, воздействие радиации и коррозионных сред [2, 3].

В отличие от традиционных вычитающих производственных технологий аддитивное производство (АП) обладает следующими преимуществами: сокращение времени изготовления, увеличение коэффициента использования материалов, а также возможность создания заданного внутреннего строения деталей. Аддитивное производство металлических материалов включает в себя различные методы, такие как селективное лазерное плавление (SLM), селективное электронно-лучевое плавление (EBSM), проволочное лазерное сплавление (WLAM), проволочная дуговая наплавка (WAAM), проволочное электронно-лучевое сплавление (EBAM) [3–16] и др. По сравнению с WLAM и WAAM, метод EBAM обладает более высокой производительностью: до 12 кг/час [7], а также позволяет снизить загрязнение окружающей среды [8] и уменьшает разбрызгивание расплавленного филамента [9, 10].

В последние годы АП стремительно расширяет сферу своего применения благодаря ряду преимуществ. Этот метод производства позволяет создавать детали сложной формы с высокой точностью, используя различные материалы – от пластика до металла, при этом значительно сокращая время и затраты по сравнению с традиционными производственными технологиями [1–4]. В зависимости от требований к конечному продукту специалисты применяют разные технологии АП. Активное развитие технологий аддитивного производства приводит к удешевлению продукции, производимой с их помощью. Оно позволяет быстро изготавливать детали и заготовки не только сложной формы, но и более простой формы из дорогостоящих материалов [5, 6]. Примером таких деталей могут быть фланцы из жаростойких материалов. При использовании АП нет необходимости изготавливать отвер-

стие; кроме того, сокращается объем материала, удаляемого за счет субтрактивной обработки. Это делает применение АП экономически обоснованным. Изготовление фланцев с помощью АП возможно под конкретный типоразмер, что дает еще большую экономию времени и затрат в сравнении с изготовлением аналогичной детали из проката [7–9].

Отдельным ограничением, сдерживающим внедрение проволочной технологии аддитивного производства, является низкая размерная точность и высокая шероховатость поверхности 3D-напечатанных деталей [14]. Порошковые варианты технологии аддитивного производства (в частности, SLM) позволяют изготавливать детали с высокой размерной точностью и низкой шероховатостью. Однако даже они не могут сравниться по величине шероховатости с чистовым токением и (или) чистовым фрезерованием [16], что обуславливает необходимость применения для них финишной механообработки.

С другой стороны, по сравнению с порошковыми версиями проволочная реализация АП, в частности метод EBAM, обладает более высокой производительностью и лучше подходит для изготовления крупногабаритных изделий [6–10]. Поэтому детали, изготовленные проволочными АП, обязательно требуют проведения последующей механической обработки. Таким образом, развитию гибридных технологий, объединяющих аддитивные и субтрактивные процессы изготовления деталей, уделяется большое внимание в научно-технической литературе [16].

Аддитивное производство также имеет преимущества в кастомизации, прототипировании и изготовлении конструкций сложной формы. Однако оно обычно не подходит для крупномасштабного массового производства, требующего в том числе применения дорогостоящего стационарного оборудования для многокоординатной механообработки. При этом полупромышленные (легкие, универсальные) станки дешевле и более гибкие в перенастройке, чем традиционные промышленные устройства. Они обычно используются для мелкосерийного производства по индивидуальному заказу либо могут быть эффективными на этапе отработки режимных параметров постпечатной механической обработки.

Принимая во внимание востребованность проволочных аддитивных технологий, пер-

спективным представляется использование полупромышленных (легких, универсальных) фрезерных станков с ЧПУ в едином технологическом цикле с установками 3D-печати. Это позволит не только аддитивно подбирать параметры механообработки формируемых заготовок, прежде всего по критериям улучшения точности и снижения шероховатости, но и устанавливать взаимосвязь между режимными параметрами аддитивного производства и обрабатываемостью резанием. Последнее также может минимизировать объем необходимых структурных исследований.

В этой связи становится актуальным проведение исследований обрабатываемости резанием аустенитной нержавеющей стали EBAM 12X18H10T и определение оптимальных режимных параметров резания при обработке как на стационарном (в том числе без СОЖ), так и на полупромышленных (универсальных, легко перенастраиваемых) станках с ЧПУ, для которых соответствующие рекомендации производителей режущего инструмента не всегда могут быть напрямую использованы.

Целью данной работы является подбор оптимальных значений режимных параметров финишного фрезерования (частота вращения, подача и ширина фрезерования) на основании одновременной оценки шероховатости обрабатываемой поверхности и скорости удаления материала при механообработке заготовок нержавеющей аустенитной стали 12X18H10T, сформированных методом EBAM. Для достижения данной цели в процессе исследования решались следующие **задачи**:

- определение механических свойств нержавеющей стали EBAM 12X18H10T;
- исследование влияния скорости резания и подачи на силу резания при механообработке на стационарном станке без использования СОЖ;
- исследование взаимосвязи скорости удаления материала и шероховатости от параметров фрезерования при механообработке на полу-промышленном широкоформатном фрезерном ЧПУ-станке с использованием СОЖ при помощи модели линейной множественной регрессии и нелинейных моделей на основе нейронных сетей прямого распространения.

Методика исследований

В качестве филамента использовали проволоку нержавеющей стали 12X18H10T диаметром 1,2 мм. В качестве подложки выбрали пластины из стали марки 12X18H10T толщиной 5 мм. Перед началом печати подложки подверглись шлифовке и последующей очистке ацетоном.

Для изготовления заготовок методом EBAM использовали установку электронно-лучевого аддитивного производства, разработанную в ИФПМ СО РАН [17]. Заготовки в форме толстой стенки размером 85×20×25 мм (рис. 1) изготавливали на экспериментальной установке EBAM с объемом вакуумной камеры 8 м³. Процесс 3D-печати осуществляли при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Ускоряющее напряжение электронного пучка составляло 30 кВ, использовалась кольцевая развертка электронного пучка диаметром 4 мм с частотой 1 кГц. Ток пучка составлял 75 мА при печати первого слоя и 50 мА при печати последующих слоев; толщина слоя – 1 мм. Печать выполняли со скоростью 400 мм/мин, скорость подачи проволоки составляла 1768 мм/мин. Химический состав материала проволоки показан в табл. 1.



Рис. 1. Фотография заготовки (в форме стенки) стали EBAM 12X18H10T

Fig. 1. Photographs of the 3D-built EBAM 0.12C-18Cr-10Ni-Ti sample

Микротвердость измеряли с помощью автоматического комплекса на базе микротвердометра EMCO-TEST DuraScan-10. Измерения проводились по методу Виккерса при нагрузке 1 кгс и выдержке 10 с. Испытания на одноосное растяжение выполняли на электромеханической испытательной машине UTS-110M-100. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 2 мм/мин.

Химический состав проволоки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т
Chemical composition of the 0.12C-18Cr-10Ni-Ti stainless steel wire

Химический состав, вес. % / Chemical composition, wt %								
Fe	Cr	Ni	Mn	Ti	Si	Cu	Mo	Co
65,3	19,6	11,5	0,8	0,7	0,7	0,5	0,32	0,7

Фрезерование 3D-напечатанных образцов для стационарных условий механообработки выполняли на станке FU 251(Россия) без СОЖ. Силу резания определяли с помощью динамометра Kistler 9257B (Швейцария) (рис. 2, а). Анализ данных проводили с использованием программного обеспечения DynoWare. Чувствительность динамометра составляет 7,5 Н, погрешность измерения $\pm 0,005\%$. При измерении силы резания в различных экспериментах (с переустановкой заготовки или фрезы) при одинаковых параметрах разброс составлял не более 15 %. При обработке резанием это достаточно хорошая повторяемость, учитывая сложность самого процесса резания и неоднородность свойств заготовки в разных зонах.

На рис. 2, б показаны параметры фрезерования, включая подачу, скорость резания, глубину, ширину и направление приложения силы резания. Использовали твердосплавные концевые фрезы (UP210-S4-12030) диаметром 12 мм производства компании GESAC (Китай), угол наклона спирали $\omega = 35^\circ$ (helix angle), длина рабочей части 30 мм, общая длина 75 мм, передний угол 7° , задний угол 5° . Известно, что величина

силы резания почти всегда напрямую зависит от обрабатываемости материала.

Исследования по фрезерованию заготовок нержавеющей стали ЕВАМ 12Х18Н10Т с применением СОЖ выполняли на широкоформатном фрезерном станке с ЧПУ RM0813 (Purelogic R&D, Россия) (рис. 3, а). Этот станок изначально предназначен для фрезерования, сверления, гравировки и раскюя деталей из цветных металлов и обладает следующими характеристиками: мощность на шпинделе 2,2 кВт, размеры рабочей зоны ($X \times Y \times Z$) $1300 \times 800 \times 200$ мм, точность позиционирования 0,1 мм на участке длины 100 мм. Использовали твердосплавные концевые фрезы (VSM-4E-D8.0) диаметром 8 мм производства компании ZC-CCT (Китай). Переменный угол наклона спирали составлял $\omega = 38^\circ/41^\circ$, длина рабочей части 20 мм, общая длина 60 мм, передний угол 7° , задний угол 10° . Шероховатость R_a боковой поверхности заготовок (после фрезерования) измеряли с помощью контактного (стилусного) профилометра TR200 (Китай) (рис. 3, б). Для повышения производительности и снижения силы резания в условиях

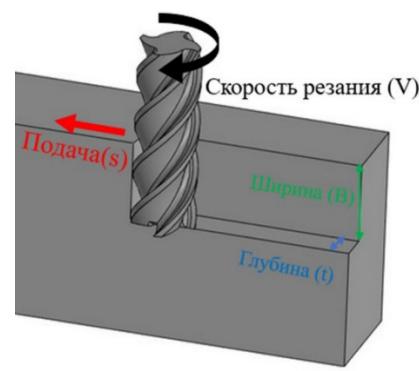
*а**б*

Рис. 2. Общий вид установки, закрепленной на стационарном станке (а), схема фрезерования (б)

Fig. 2. General view of the setup fixed on the milling machine (a), milling scheme (b)

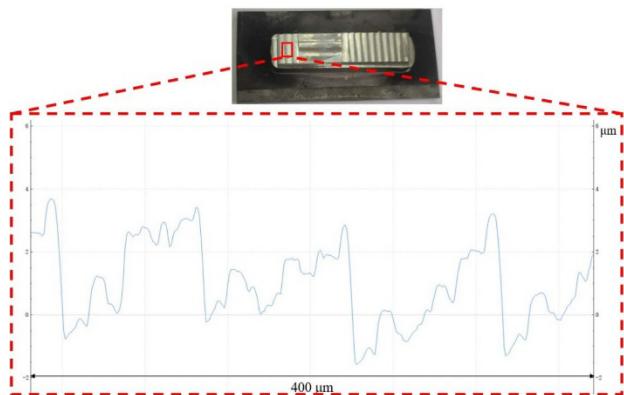
*a**б*

Рис. 3. Полупромышленный широкоформатный фрезерный станок с ЧПУ RM0813-01S2 (а), пример профиля поверхности заготовки после финишной механобработки (б)

Fig. 3. The RM0813-01S2 CNC machine (a), an example of the surface profile after milling (b)

применения СОЖ использовали более высокие величины скорости резания и подачи.

Для планирования экспериментов по резанию применяли метод Тагучи (Taguchi Method), в котором критерием оптимизации служит соотношение «сигнал/шум» (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Последнее используется для оценки устойчивости и надежности выходных параметров (прежде всего шероховатости) и применяет ортогональные матрицы (Orthogonal Arrays) как инструмент ухода от полного факторного эксперимента [18, 19]. В опубликованных в настоящее время статьях метод Тагучи в основном используется для анализа влияния различных параметров обработки на качество поверхности [20]. Была выбрана ортогональная матрица L9, режимные параметры фрезерования (факторы: частота вращения шпинделя, подача и ширина фрезерования) для которой приведены в табл. 3. Для каждого из них было выбрано по три уровня, что, в свою очередь, определяло скорость удаления материала. Ключевым выходным параметром являлась шероховатость.

Результаты и их обсуждение

Значения твердости и деформационно-прочностные характеристики исследованных образцов приведены в табл. 2. Видно, что нержавеющая сталь EBAM 12X18H10T обладает высокими значениями пластичности (70 %), предела прочности (570 МПа) и твердости (191 HV). Прочностные свойства листового про-

ката стали 12Х18Н10Т были выше, чем у аддитивной EBAM 12Х18Н10Т, это обусловлено тем, что листовой прокат имеет более высокое содержание феррита, более мелкие зерна и более высокую плотность дислокаций [21]. Для EBAM 12Х18Н10Т при послойном выращивании аустенитная сталь испытывает многократные циклы нагрева-остывания, что приводит к образованию столбчатых зерен. Однако следует отметить, что скорость коррозии листового проката 12Х18Н10Т примерно в два раза выше, чем для аддитивной стали.

Исследования обрабатываемости на стационарном фрезерном станке

Как показано в табл. 3, для исследования разницы в величине силы резания заготовки нержавеющей стали EBAM 12Х18Н10Т использовали девять режимов фрезерования, которые включали в себя малую скорость и большую подачу, большую скорость и малую подачу, а также среднюю скорость и среднюю подачу и т. д.

Выбор параметров фрезерования основан на рекомендациях производителя инструмента. Отметим, что высокопроизводительный режим фрезерования (большое соотношение ширина/глубина, см. табл. 3.) позволяет снизить вероятность быстрого износа инструмента.

На рис. 4, *a* показано влияние различных режимов фрезерования на силу резания для заготовки нержавеющей стали EBAM 12Х18Н10Т. Для оценки силы резания использовали суммарную силу при фрезеровании заготовки:

Таблица 2
Table 2

Механические характеристики нержавеющей стали EBAM 12X18H10T
Mechanical properties of the EBAM 0.12C-18Cr-10Ni-Ti sample

Образцы / Samples	Предел прочности, МПа / Tensile strength, MPa	Предел текучести, МПа / Yield strength, MPa	Относительное удлинение, % / Elongation, %	Твердость, HV / Hardness, HV
EBAM 12X18H10T / EBAM 0.12C-18Cr-10Ni-Ti	570 ± 10	208 ± 10	70 ± 2 %	191 ± 5
Прокат 12X18H10T / Wrought 0.12C-18Cr-10Ni-Ti	700 ± 10	250 ± 10	63 ± 3 %	230 ± 5

Таблица 3
Table 3

Режимные параметры фрезерования для исследования силы резания на промышленном фрезерном станке

Parameters applied for studying the cutting forces during milling using the industrial machine

Номер/ Number	Скорость резания V , (м/мин) / Cutting speed V , m/min	Подача S , (мм/мин) / Feed rate S , mm/min	Ширина B , (мм) / Width B , mm	Глубина t , (мм) / Depth t , mm
1	25	50	8	0,5
2	25	160		
3	25	250		
4	50	50		
5	50	160		
6	50	250		
7	75	50		
8	75	160		
9	75	250		

$$F_{xyz} = \sqrt{(F_X^{\max})^2 + (F_Y^{\max})^2 + (F_Z^{\max})^2}, \quad (1)$$

где F^{\max} – максимальное значение силы на интервале анализа.

Было обнаружено, что при режиме № 4 сила резания является наименьшей ($F_{xyz} = 188 N$).

На рис. 4, б показано влияние скорости резания и подачи на силу резания при обработке заготовки EBAM 12X18H10T. Видно, что в процессе фрезерования прочность и твердость стали, сформированной технологией АП,

существенно влияют на силу резания. Низкая скорость резания и высокая подача приводили к увеличению силы резания, а высокая скорость резания и низкая подача, наоборот, уменьшали ее.

В целом наблюдаются две тенденции: при увеличении скорости резания ее сила уменьшается; при увеличении величины подачи – наоборот. Когда же глубина и ширина остаются неизменными, большая подача означает большую производительность. По этой причине при механообработке стали EBAM 12X18H10T, получен-

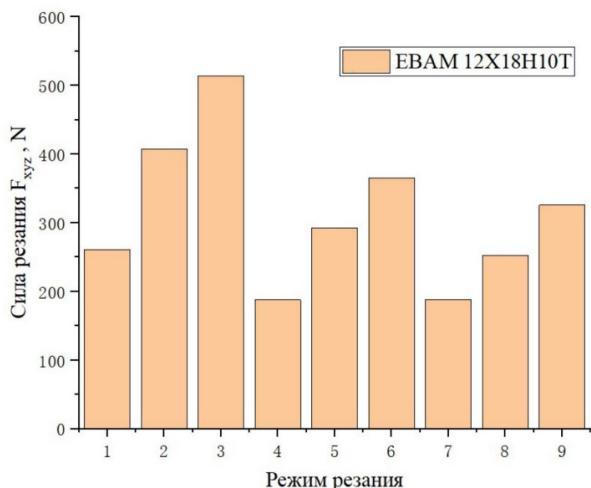
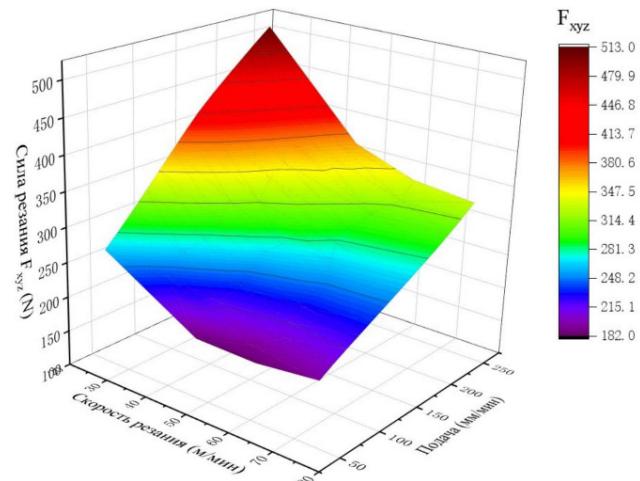
*a**b*

Рис. 4. Влияние различных режимов резания на силу резания (*a*), влияние скорости резания и подачи на силу резания при механообработке (*б*)

Fig. 4. The effect of different cutting modes on the cutting force (*a*), the effect of cutting speed and feed rate on the cutting force during machining (*b*)

ной технологией АП, для повышения производительности и снижения силы резания следует использовать более высокую скорость, но не увеличивать подачу.

Исследования на широкоформатном фрезерном станке с ЧПУ RM0813

Известно, что шероховатость зависит от многочисленных параметров, среди которых скорость резания, подача, глубина, износ инструмента [22]. В табл. 4 показаны параметры фрезерования для исследования шероховатости и скорости удаления материала MRR , включая частоту вращения фрезы, подачу и глубину.

Как было отмечено выше, механообработка на широкоформатном фрезерном станке с ЧПУ может проводиться на режимах, отличающихся от рекомендаций производителей режущего инструмента. По этой причине актуально развитие подходов, позволяющих решать задачу определения оптимальных режимных параметров фрезерования при минимальных затратах времени и ресурсов. Оценка оптимальных параметров резания может рассматриваться как задача поиска таких режимов фрезерования, при которых достигается условие оптимальности.

В качестве критерия оптимальности должна выступать комплексная оценка как самого процесса фрезерования, так и качества изделия. Среди характеристик данного процесса анали-

зировали скорость удаления материала MRR , а оценку качества изделия наилучшим образом характеризует шероховатость поверхности после обработки Ra . За рамки данных экспериментов выведена еще одна важная характеристика процесса фрезерования – износ инструмента, так как выбранные режимы являются щадящими, а времена наблюдения слишком коротким. В итоге критерий оптимальности может быть записан в виде системы предельных выражений:

$$\begin{cases} Ra(S, B, N) \rightarrow \min, \\ MRR(S, B) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2)$$

На основе выражения (2) можно построить более формальный критерий субоптимальности в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} Ra(S, B, N) \leq \overline{Ra}, \\ MRR(S, B) \geq \overline{MRR}, \end{cases} \quad (3)$$

где \overline{Ra} и \overline{MRR} – предельные минимальное и максимальное значения характеристик. Область значений параметров (S, B, N) , удовлетворяющих системе неравенств (3), будем называть областью субоптимальных параметров (СОП) [23].

Результаты анализа значений допустимых параметров резания приведены в табл. 5. Использованная модель «Regress» обладает следующими статистиками: коэффициент детерминации

Таблица 4
Table 4

**Режимы фрезерования на полупромышленном станке по плану Тагучи
и результаты оценки обрабатываемости**

**Milling parameters for the semi-industrial machine, determined using the Taguchi method
and machinability assessment results**

Номер / Number	Частота вращения N , об/мин / Spindle speed N , rpm	Подача S , мм/мин / Feed rate S , mm/min	Ширина B , мм / Width B , mm	Глубина t , мм / Depth t , mm	Шероховатость R_a , мкм / Surface roughness R_a , μm	MRR , мм ³ /мин / MRR , mm ³ /min
1	1000	200	0,1	4	0,46 ± 0,02	80
2	1000	400	0,3		1,29 ± 0,04	480
3	1000	600	0,5		2,57 ± 0,23	1200
4	2500	200	0,3		0,59 ± 0,03	240
5	2500	400	0,5		1,01 ± 0,04	800
6	2500	600	0,1		0,88 ± 0,04	240
7	4000	200	0,5		0,63 ± 0,03	400
8	4000	400	0,1		0,40 ± 0,01	160
9	4000	600	0,3		0,75 ± 0,03	720

Таблица 5
Table 5

**Области анализа: параметры резания, характеристики изделия и процесса фрезерования,
их предельные значения**

Limiting ranges and suboptimality boundaries for the milling parameters and analyzed characteristics

Параметры и характеристики / Parameters, characteristics	Допустимые пределы / Permissible limits		Границы субоптимальности / Sub-optimality boundaries	
	Мин / Min	Макс / Max	Мин / Min	Макс / Max
<i>Параметры / Parameters</i>				
Частота вращения N , об/мин / Spindle speed N , rpm	500	5000	—	—
Подача S , мм/мин / Feed rate S , mm/min	100	800	—	—
Ширина B , мм / Width B , mm	0,1	1	—	—
<i>Характеристики / Characteristics</i>				
Шероховатость R_a , мкм / Surface roughness R_a , μm	0	4	—	0,8
MRR , мм ³ /мин / MRR , mm ³ /min	0	2000	300	—

$R^2 = 0,884$, нормированная среднеквадратическая ошибка $NMSE = 0,214$ и уровень значимости $p = 0,0089$. По данной модели в области допустимых значений параметров фрезерования рассчитаны прогнозные значения шероховатости, выделена область СОП, удовлетворяющая

условию (1), и построен график поверхности области СОП (рис. 5, а, в). Несмотря на полученные высокие показатели качества регрессионной модели, далее проверялась гипотеза о нелинейной взаимосвязи шероховатости с параметрами фрезерования.

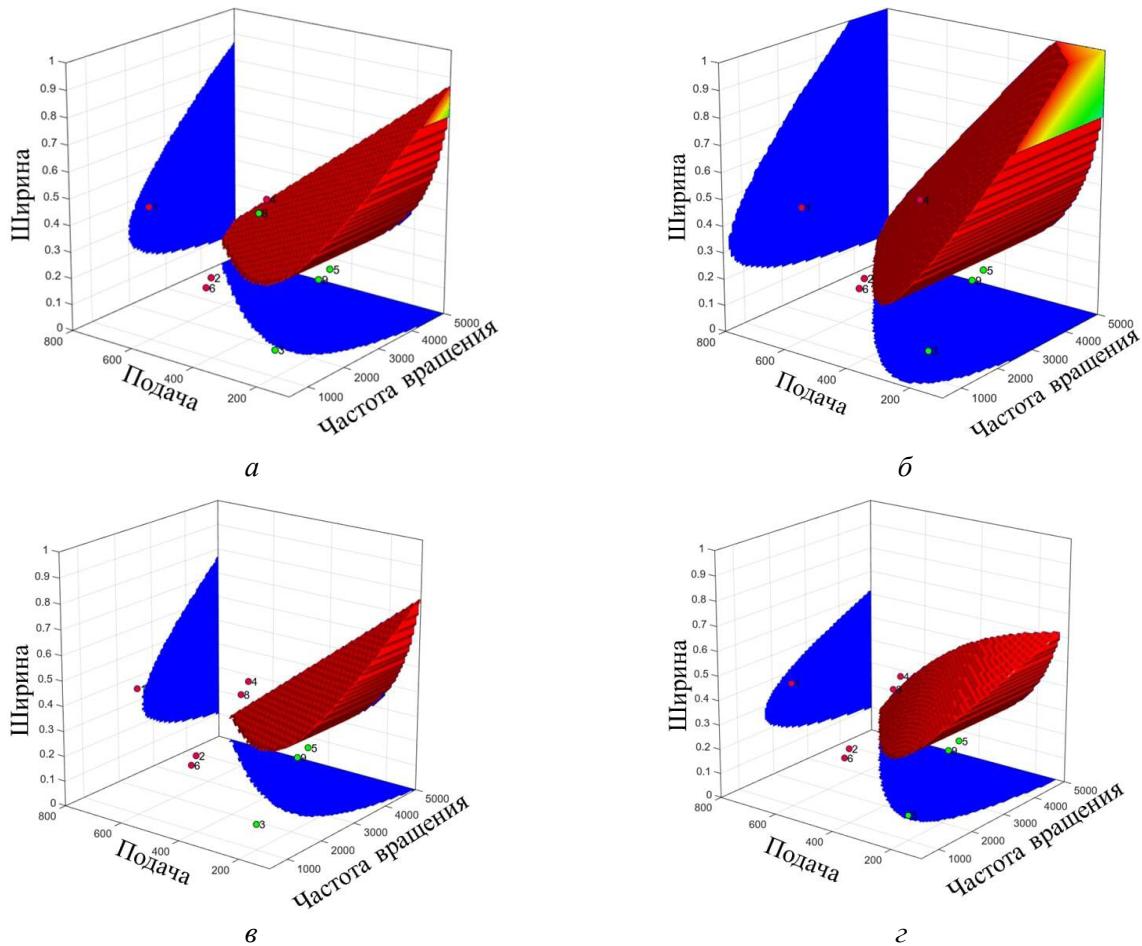


Рис. 5. Параметры экспериментов и области субоптимальных параметров, построенные по (а, в) линейной регрессионной модели, и (б, г) модель FFNN при $\bar{p} = 300 \text{ мм}^3/\text{мин}$,

$$\overline{Ra} = 0,8 \text{ мкм (а, б) и } \overline{Ra} = 0,6 \text{ мкм (в, г)}$$

Fig. 5. Milling parameters and the SOP regions plotted using the linear regression model (a, в) and the FFNN model (б, г) at $\bar{p} = 300 \text{ mm}^3/\text{min}$; $\overline{Ra} = 0.8 \mu\text{m}$ (а, б) and $\overline{Ra} = 0.6 \mu\text{m}$ (в, г)

По данным девяти экспериментов по плану Тагути (табл. 4) методом наименьших квадратов проведен расчет коэффициентов линейной множественной регрессии [24–26]. Получено уравнение шероховатости:

$$Ra = 0,2014 - 0,00028N + \\ + 0,0021S + 2,059B. \quad (4)$$

В качестве нелинейной модели, способной обобщить результаты натурных экспериментов, был выбран путь нейросетевого моделирования [27, 28]. Модель создавалась на базе сетей прямого распространения (FFNN). Архитектура сети подбиралась по принципу от простого к сложному. Обучающая выборка формировалась из экспериментальных данных (табл. 3) с нормировкой входных и выходных данных в допустимые пределы согласно табл. 5. Наилучшая

скорость сходимости обучения была достигнута при выборе логарифмического тангенса в качестве активационных функций и метода обучения Левенберга – Марквардта. Выбор количества слоев и нейронов в слое опирался на анализ построенной моделью области СОП.

Среди всех рассмотренных вариантов выбрана сеть из одного скрытого слоя с тремя нейронами, показавшая наиболее простую и правдоподобную область СОП (рис. 5, б, г). Данная модель обладает лучшими (по сравнению с регрессионной моделью) характеристиками соответствия прогноза и обучающей выборки: $MSE = 0,00049061$, $R^2 = 0,99504$.

Сравнение областей СОП для двух моделей и двух ограничений по шероховатости показывает, что модель нейронной сети для больших значений порога шероховатости ($\overline{Ra} > 0,65 \text{ мкм}$)

ограничивает сверху область СОП поверхностью, близкой к линейной, но отличается от модели линейной регрессии большим углом наклона. Иначе говоря, нейронная сеть включает в область СОП параметры фрезерования с большей шириной и большей скоростью удаления материала в области низких значений подачи. Однако для более низких значений порога шероховатости ($R_a < 0,65 \text{ мкм}$) модель FFNN ограничивает сверху область СОП нелинейной поверхностью, приводящей к обратному эффекту: из области СОП исключаются параметры фрезерования с высокими значениями ширины и частоты вращения.

Для проверки выявленных разногласий проводилась верификация разработанных моделей путем проведения натурных экспериментов и сопоставления прогнозных и реальных наблюдений шероховатости. Параметры экспериментов выбирались из следующих условий: значения вне области прогнозируемой области СОП (№ 10, табл. 6), граничные значения области СОП (№ 11, табл. 6) и внутренняя точка области СОП (№ 12, табл. 6). В табл. 5 приведены также прогнозные значения шероховатости и результаты экспериментов.

Установлено, что обе модели обеспечили ошибку с приемлемым отклонением, но по величине средних отклонений более высокую точность показала линейная регрессионная модель. Ее прогноз оптимальных параметров фрезерования: при частоте вращения 4500 об/мин, $S = 404 \text{ мм/мин}$ и $B = 0,43 \text{ мм}$ с прогнозируемой шероховатостью 0,648 мкм и скоростью удаления материала $695 \text{ мм}^3/\text{мин}$.

В работе [29] оптимальные параметры резания при фрезеровании нержавеющей стали 12Х18Н10Т подбирали с помощью метода Тагучи. При этом учитывали влияние частоты вращения фрезы, величины подачи и глубины фрезерования на шероховатость поверхности, износ инструмента и скорость удаления материала. В работе [30] для сравнения износа инструмента и силы резания использовали различные геометрические характеристики инструмента, скорость и величину подачи, а также соотношение между глубиной и шириной резания. Показано, что выбор параметров фрезерования является сложной многокритериальной задачей и сопряжен с необходимостью проведения большого числа экспериментов. В качестве перспективного направления данного исследования ставится целью оценка факторов, влияющих на шероховатость поверхности образца ЕВАМ 12Х18Н10Т, при обеспечении высокой скорости удаления материала.

В целом сопоставление данных оценки обрабатываемости для промышленного и широкоформатного фрезерного станка с ЧПУ при чистовом фрезеровании нержавеющей стали ЕВАМ 12Х18Н10Т показало, что для получения более высокой скорости удаления материала и снижения шероховатости, а также силы резания следует увеличить скорость резания при сохранении величины подачи. С другой стороны, разработанные модели «Rgress» и FFNN для полустанционарного станка позволяют предсказывать оптимальные режимные параметры, что крайне актуально в случае отработки режимов 3D-печати, сопровождающихся изменением

Таблица 6

Table 6

Режимы фрезерования для верификации моделей, реальные и прогнозные результаты

Milling parameters for model verification, along with experimental and predicted results

№ / No.	Параметры фрезерования / Milling parameters			Характеристики / Characteristics		
	Частота вращения N , об/мин / Spindle speed N , rpm	Подача S , мм/мин / Feed rate S , mm/min	Ширина B , мм / Width B , mm	$MRR, \text{мм}^3/\text{мин} / MRR,$ mm^3/min	Шероховатость R_a , мкм / Surface roughness R_a , μm	
10	4000	100	0,5	200	0,333	0,3117
11	4000	600	0,5	1200	1,193	1,3617
12	4500	400	0,3	480	0,425	0,3889
Среднее отклонение / Average deviation					0,0753	0,1753

структуры и механических свойств послойно выращенных заготовок.

В то же время износ инструмента также является важным фактором при оценке обрабатываемости материала. Шероховатость поверхности увеличивается с течением времени обработки вследствие износа режущего инструмента. В будущих исследованиях планируется использовать линейную регрессионную модель для определения оптимального диапазона параметров с последующим изучением влияния времени обработки на износ инструмента и шероховатость поверхности.

Выводы

1. Нержавеющая сталь EBAM 12X18H10T, сформированная технологией АП, обладает высокими значениями пластичности (70 %), предела прочности (570 МПа) и твердости (191 HV).

2. Показано, что для повышения производительности (скорости удаления материала) и снижения силы резания на стационарном станке без применения СОЖ рекомендуется увеличивать скорость фрезерования, но не повышать величину подачи.

3. При исследовании взаимосвязи скорости удаления материала и шероховатости от параметров фрезерования на полупромышленном широкоформатном фрезерном станке с ЧПУ (с невысокой жесткостью порталной рамы) при применении СОЖ использованы модели линейной множественной регрессии и нелинейные модели на основе нейронных сетей прямого распространения. Показано, что для прогноза оптимальных параметров фрезерования достаточно использовать линейные регрессионные модели. Однако необходимо учесть, что исследования проводились в узких рамках щадящих режимов при малых временах механообработки и без учета износа инструмента. В этих ограничениях дан прогноз оптимальных параметров фрезерования EBAM 12X18H10T: при частоте вращения 4500 об/мин, $S = 404$ мм/мин и $B = 0,43$ мм с прогнозируемой шероховатостью $Ra = 0,648$ мкм и скоростью удаления материала $695 \text{ мм}^3/\text{мин}$.

Список литературы

1. Lippold J.C., Kotecki D.J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. – 357 p. – ISBN 978-0-471-47379-4.

2. Research progress on the relationship between microstructure and properties of AISI 321 stainless steel / Z. Huang, J. Zhang, Z. Ma, S. Yuan, H. Yang // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14 (22). – P. 10196. – DOI: 10.3390/app142210196.

3. Transformation law of microstructure evolution and mechanical properties of electron beam free-form fabricated 321 austenitic stainless steel / Q. Yin, G. Chen, H. Cao, G. Zhang, B. Zhang, S. Wei // Vacuum. – 2021. – Vol. 194. – P. 110594. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110594.

4. Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel / M. Ma, Z. Wang, M. Gao, X. Zeng // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 215. – P. 142–150. – DOI: 10.1016/j.jmatprotex.2014.07.034.

5. Correlation between heat treatment process parameters, phase composition, texture, and mechanical properties of 12H18N10T stainless steel processed by selective laser melting / A.L. Kameneva, A.A. Minkova, N.N. Cherkashneva, V.V. Karmanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 447 (1). – P. 012043. – DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012043.

6. Microstructure and corrosion properties of wire arc additively manufactured multi-trace and multilayer stainless steel 321 / X. Wang, Q. Hu, W. Liu, W. Yuan, X. Shen, F. Gao, D. Tang, Z. Hu // Metals. – 2022. – Vol. 12. – P. 1039. – DOI: 10.3390/met12061039.

7. Laser additive manufacturing of Inconel 718 at increased deposition rates / C. Zhong, A. Gasser, G. Backes, J. Fu, J.H. Schleifenbaum // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 844. – P. 143196. – DOI: 10.1016/j.msea.2022.143196.

8. Sciaky Inc. Benefits of Wire vs. Powder Metal 3D Printing. Comparing Sciaky's wirefeed 3D printing process, a.k.a. Electron Beam Additive Manufacturing, to powder-based feedstock 3D printing processes. 2008. – URL: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder> (accessed: 30.10.2025).

9. Coaxial laser metal wire deposition of Ti6Al4V alloy: process, microstructure and mechanical properties / Y. Chen, X. Chen, M. Jiang, Z. Lei, Z. Wang, J. Liang, S. Wu, S. Ma, N. Jiang, Y. Chen // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 20. – P. 2578–2590. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.08.068.

10. Wire + arc additive manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength / A. Caballero, J. Ding, S. Ganguly, S. Williams // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 268. – P. 54–62. – DOI: 10.1016/j.jmatprotex.2019.01.007.

11. Węglowski M.S., Blacha S., Phillips A. Electron beam welding – Techniques and trends – Review // Vac-

uum. – 2016. – Vol. 130. – P. 72–92. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004.

12. Wang D., Liu Z., Liu W. Experimental measurement of vacuum evaporation of aluminum in Ti-Al, V-Al, Ti₆Al4V alloys by electron beam // Metals. – 2021. – Vol. 11 (11). – P. 1688. – DOI: 10.3390/met11111688.

13. Microstructural evolution in a thin wall of 2Cr13 martensitic stainless steel during wire arc additive manufacturing / Z. Lyu, Y.S. Sato, S. Tokita, Y. Zhao, J. Jia, A. Wu // Materials Characterization. – 2021. – Vol. 182. – P. 111520. – DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111520.

14. 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.Yu. Konyukhov, D.V. Valuev // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 4529. – DOI: 10.3390/matdes.2023.16134529.

15. Direct laser fabrication of three dimensional components using SC420 stainless steel / G.A. Ravi, X.J. Hao, N. Wain, X. Wu, M.M. Attallah // Materials & Design. – 2013. – Vol. 47. – P. 731–736. – DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.062.

16. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review // Journal of Machine Engineering. – 2018. – Vol. 18. – P. 5–24. – DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.

17. Influence of anisotropy properties and structural inhomogeneity on elasticity and fracture of titanium alloys produced by electron-beam melting / V.A. Klimenov, E.A. Kolubaev, Z. Han, A.V. Chumaevskii, A.A. Klopotov, A.M. Ustinov, Z.G. Kovalevskaya, E. Moskvichev, M. Pan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 135. – P. 5575–5594. – DOI: 10.1007/s00170-024-14843-7.

18. Park S.H. Robust design and analysis for quality engineering. – London: Chapman & Hall, 1996. – 256 p.

19. Phadke M.S. Quality engineering using robust design. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989. – 320 p.

20. Nalbant M., Gökkaya H., Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning // Materials & Design. – 2007. – Vol. 28 (4). – P. 1379–1385. – DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.008.

21. Comprehensive analysis of microstructure and mechanical, operational, and technological properties

of AISI 321 austenitic stainless steel at electron beam freeform fabrication / S.V. Panin, M. Qi, D.Yu. Stepanov, M.V. Burkov, V.E. Rubtsov, Y.V. Kushnarev, I.Yu. Litovchenko // Construction Materials. – 2025. – Vol. 5 (3). – P. 62. – DOI: 10.3390/constrmater5030062.

22. Zhang J.Z., Chen J.C., Kirby E.D. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 184 (1–3). – P. 233–239. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029.

23. Application of neural network models with ultra-small samples to optimize the ultrasonic consolidation parameters for ‘PEI Adherend/Prepreg (CF-PEI Fabric)/PEI Adherend’ lap joints / D.Y. Stepanov, D. Tian, V.O. Alexenko, S.V. Panin, D.G. Buslovich // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – P. 451. – DOI: 10.3390/polym16040451.

24. Draper N.R., Harry S. Applied regression analysis. – 3rd ed. – Wiley-Interscience, 1998. – 736 p. – ISBN 0471170828. – ISBN 9780471170822.

25. Куприенко Н.В., Пономарева О.А., Тихонов Д.В. Статистические методы изучения связей: Корреляционно-регрессионный анализ: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 118 с.

26. Yan X., Su X. Linear regression analysis: Theory and computing. – Singapore: World Scientific Publishing, 2009. – 328 p. – ISBN 9812834109. – ISBN 9789812834102.

27. Haykin S.S. Neural networks and learning machines. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009. – ISBN 978-0131471399.

28. Swingle K. Applying neural networks: A practical guide. – San Francisco, CA: Morgan Kaufman Publishers, 1996. – 303 p. – ISBN 0126791708. – ISBN 9780126791709.

29. Holkar H., Sadaiah M. Optimization of end milling machining parameters of AISI 321stainless steel using Taguchi method // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. – 2016. – Vol. 4. – P. 20–23.

30. Study of the machinability of an Inconel 625 composite with added NiTi-TiB₂ fabricated by direct laser deposition / A. Arlyapov, S. Volkov, V. Promakhov, A. Matveev, A. Babaev, A. Vorozhtsov, A. Zhukov // Metals. – 2022. – Vol. 12 (11). – P. 1956. – DOI: 10.3390/met12111956.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Optimal milling parameters of 0.12 C-18 Cr-10Ni-Ti stainless steel fabricated by electron beam additive manufacturing

Mengxu Qi^{1, a}, Sergey Panin^{2, b, *}, Dmitry Stepanov^{2, c}, Mikhail Burkov^{2, d}, Qingrong Zhang^{1, e}

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

² Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 2/4 per. Academiceskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3738-0193>, mensuy1@tpu.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7623-7360>, svp@ispms.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0003-2558-7613>, sdu@ispms.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-3337-6579>, burkovispms@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0002-7820-1227>, cinzhun1@tpu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08 September 2025

Revised: 01 October 2025

Accepted: 29 October 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Additive manufacturing

AISI 321

Electron beam additive manufacturing

Milling

Multiple regression method

Feed-Forward Neural Network

Funding

The study was financially supported by the Russian Federation via Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2023-456).

Acknowledgements

Research were conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials" NSTU. The authors thank Yu.V. Kushnarev for assistance in fabricating 0.12C-18Cr-10Ni-Ti steel samples at the experimental facility of ISPMS SB RAS.

For citation: Qi M., Panin S.V., Stepanov D.Y., Burkov M.V., Zhang Q. Optimal milling parameters of 0.12 C-18 Cr-10Ni-Ti stainless steel fabricated by electron beam additive manufacturing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 116–130. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-116-130. (In Russian).

ABSTRACT

Introduction. Unlike traditional manufacturing processes, additive manufacturing (AM) offers improved efficiency while being environmentally friendly. A significant limitation hindering the adoption of wire-based electron beam additive manufacturing (EBAM) technology is the relatively low quality and high surface roughness of 3D-printed parts. **The purpose of this study** is to establish the optimal values of milling process parameters (rotational speed, feed rate, and milling width) based on the simultaneous evaluation of the surface roughness of the machined surface and the material removal rate. **Methods and materials.** This study investigated specimens fabricated using EBAM technology. Uniaxial tensile tests were conducted on an electromechanical testing machine. Cutting forces were determined with a Kistler 9257B dynamometer. Milling studies of EBAM 321 steel workpieces were performed on a semi-industrial CNC milling machine. **Results and discussion.** It was shown that in order to increase the material removal rate and reduce the cutting force on a milling machine without the use of coolant, it is recommended to increase the milling speed, but not to increase the feed rate. To investigate the relationship between material removal rate and surface roughness relative to milling parameters on a semi-industrial machine (with an average stiffness of the portal frame), multiple linear regression models and nonlinear models based on feedforward neural networks were employed. It was demonstrated that linear regression models are sufficient for predicting optimal milling parameters. However, it should be noted that the study was conducted within a narrow range of gentle machining conditions, with short processing times and without accounting for tool wear. Under these constraints, the optimal milling parameters for EBAM 321 steel were predicted as follows: spindle speed of 4,500 rpm, feed rate $S = 404$ mm/min, and cutting depth $B = 0.43$ mm, resulting in a predicted surface roughness (R_a) of 0.648 μm and a material removal rate of 695 mm^3/min .

References

1. Lippold J.C., Kotecki D.J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2005. 357 p. ISBN 978-0-471-47379-4.

* Corresponding author

Panin Sergey V., D.Sc. (Engineering), Professor

Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,
2/4 per. Academiceskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: +7 3822 286-904, e-mail: svp@ispms.ru

2. Huang Z., Zhang J., Ma Z., Yuan S., Yang H. Research progress on the relationship between microstructure and properties of AISI 321 stainless steel. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (22), p. 10196. DOI: 10.3390/app142210196.
3. Yin Q., Chen G., Cao H., Zhang G., Zhang B., Wei S. Transformation law of microstructure evolution and mechanical properties of electron beam freeform fabricated 321 austenitic stainless steel. *Vacuum*, 2021, vol. 194, p. 110594. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110594.
4. Ma M., Wang Z., Gao M., Zeng X. Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 215, pp. 142–150. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.034.
5. Kameneva A.L., Minkova A.A., Cherkashneva N.N., Karmanov V.V. Correlation between heat treatment process parameters, phase composition, texture, and mechanical properties of 12H18N10T stainless steel processed by selective laser melting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 447 (1), p. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012043.
6. Wang X., Hu Q., Liu W., Yuan W., Shen X., Gao F., Tang D., Hu Z. Microstructure and corrosion properties of wire arc additively manufactured multi-trace and multilayer stainless steel 321. *Metals*, 2022, vol. 12, p. 1039. DOI: 10.3390/met12061039.
7. Zhong C., Gasser A., Backes G., Fu J., Schleifenbaum J.H. Laser additive manufacturing of Inconel 718 at increased deposition rates. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 844, p. 143196. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143196.
8. Sciaky Inc. *Benefits of Wire vs. Powder Metal 3D Printing. Comparing Sciaky's wirefeed 3D printing process, a.k.a. Electron Beam Additive Manufacturing, to powder-based feedstock 3D printing processes*. Available at: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder> (accessed 30.10.2025).
9. Chen Y., Chen X., Jiang M., Lei Z., Wang Z., Liang J., Wu S., Ma S., Jiang N., Chen Y. Coaxial laser metal wire deposition of Ti6Al4V alloy: process, microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 20, pp. 2578–2590. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.08.068.
10. Caballero A., Ding J., Ganguly S., Williams S. Wire + arc additive manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 268, pp. 54–62. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.01.007.
11. Węglowski M.S., Błacha S., Phillips A. Electron beam welding – Techniques and trends – Review. *Vacuum*, 2016, vol. 130, pp. 72–92. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004.
12. Wang D., Liu Z., Liu W. Experimental measurement of vacuum evaporation of aluminum in Ti-Al, V-Al, Ti6Al4V alloys by electron beam. *Metals*, 2021, vol. 11 (11), p. 1688. DOI: 10.3390/met11111688.
13. Lyu Z., Sato Y.S., Tokita S., Zhao Y., Jia J., Wu A. Microstructural evolution in a thin wall of 2Cr13 martensitic stainless steel during wire arc additive manufacturing. *Materials Characterization*, 2021, vol. 182, p. 111520. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111520.
14. Martyushev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Tynchenko V.S., Kononenko R.V., Konyukhov V.Yu., 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.
15. Ravi G.A., Hao X., Wain N., Wu X., Attallah M.M. Direct laser fabrication of three dimensional components using SC420 stainless steel. *Materials & Design*, 2013, vol. 47, pp. 731–736. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.062.
16. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review. *Journal of Machine Engineering*, 2018, vol. 18, pp. 5–24. DOI: 10.5604/01.3001.0012.7629.
17. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z., Chumaevskii A.V., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Kovalevskaya Z.G., Moskvichev E., Pan M. Influence of anisotropy properties and structural inhomogeneity on elasticity and fracture of titanium alloys produced by electron-beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 135, pp. 5575–5594. DOI: 10.1007/s00170-024-14843-7.
18. Park S.H. *Robust design and analysis for quality engineering*. London, Chapman & Hall, 1996. 256 p.
19. Phadke M.S. *Quality engineering using robust design*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1989. 320 p.
20. Nalbant M., Gökkaya H., Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & Design*, 2007, vol. 28 (4), pp. 1379–1385. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.008.
21. Panin S.V., Qi M., Stepanov D.Y., Burkov M.V., Rubtsov V.E., Kushnarev Y.V., Litovchenko I.Yu. Comprehensive analysis of microstructure and mechanical, operational, and technological properties of AISI 321 austenitic stainless steel at electron beam freeform fabrication. *Construction Materials*, 2025, vol. 5 (3), p. 62. DOI: 10.3390/constrmater5030062.

22. Zhang J.Z., Chen J.C., Kirby E.D. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 184 (1–3), pp. 233–239. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029.
23. Stepanov D.Y., Tian D., Alexenko V.O., Panin S.V., Buslovich D.G. Application of neural network models with ultra-small samples to optimize the ultrasonic consolidation parameters for ‘PEI Adherend/Prepreg (CF-PEI Fabric)/PEI Adherend’ lap joints. *Polymers*, 2024, vol. 16, p. 451. DOI: 10.3390/polym16040451.
24. Draper N.R., Harry S. *Applied regression analysis*. 3rd ed. Wiley-Interscience, 1998. 736 p. ISBN 0471170828. ISBN 9780471170822.
25. Kuprienko N.V., Ponomareva O.A., Tikhonov D.V. *Statisticheskie metody izucheniya svyazi: Korrelyatsionno-regressionnyi analiz* [Statistical methods for studying relationships]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2009. 118 p.
26. Yan X., Su X. *Linear regression analysis: Theory and computing*. Singapore, World Scientific Publishing, 2009. 328 p. ISBN 9812834109. ISBN 9789812834102.
27. Haykin S.S. *Neural networks and learning machines*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson Education, 2009. ISBN 978-0131471399.
28. Swingler K. *Applying neural networks: A practical guide*. San Francisco, CA, Morgan Kaufman Publishers, 1996. 303 p. ISBN 0126791708. ISBN 9780126791709.
29. Holkar H., Sadaiah M. Optimization of end milling machining parameters of AISI 321stainless steel using Taguchi method. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2016, vol. 4, pp. 20–23.
30. Arlyapov A., Volkov S., Promakhov V., Matveev A., Babaev A., Vorozhtsov A., Zhukov A. Study of the machinability of an Inconel 625 composite with added NiTi-TiB₂ fabricated by direct laser deposition. *Metals*, 2022, vol. 12 (11), p. 1956. DOI: 10.3390/met12111956.

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>).