

УДК 621.01:621.77.04

Влияние 3D-печатной структуры металла на процесс резания и формирование стружки

Новгородова Мария Васильевна

novmarva@gmail.com

Сережкин Михаил Александрович^(*).

pehobatop@gmail.com

SPIN-код: 3499-0234

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе исследованы особенности процесса точения образцов из нержавеющей стали 08X18H10T, полученных методом аддитивного технологий. Проанализировано влияние анизотропии, остаточных напряжений и неоднородности структуры, характерных для аддитивно произведенных материалов, на силовые параметры резания, характер стружкообразования и износ режущего инструмента различных типов (P6M5, T5K10, T15K6, BK8, AP10AT). Установлено, что твердосплавные пластины группы BK8 демонстрируют наибольшую стабильность процесса и обеспечивают наилучшее качество обработки благодаря высокой ударной вязкости и теплопроводности. Выявлены корреляции между микроструктурой материала, коэффициентом усадки стружки и геометрией среза.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать металлом, механическая обработка, резание, стружкообразование, анизотропия, твердый сплав, микроструктура, остаточные напряжения

Technical translation Effect of 3D-printed metal structure on cutting process and chip formation

Novgorodova Maria Vasilievna

novmarva@gmail.com

Serezhkin Mikhail Alexandrovich^(*).

pehobatop@gmail.com

SPIN-code: 3499-0234

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper examines the features of the process of turning 08KH18N10T stainless steel samples obtained by additive techniques. Influence of anisotropy, the residual tension and heterogeneity of structure characteristic is analyzed for it is additive the produced materials, on power parameters of cutting, the nature of a chip extraction and wear of the cutting tool of various types (P6M5, T5K10, T15K6, BK8, AP10AT). Group VK8 carbide plates have been found to exhibit the greatest process stability and provide the best workmanship due to their high toughness and thermal conductivity. Correlations between material microstructure, chip shrinkage ratio and shear geometry have been identified.

Keywords: additive technologies, 3D printing with metal, machining, cutting, chip formation, anisotropy, hard alloy, microstructure, residual stresses

Введение. Аддитивные технологии приобретают все большую популярность и находят все большее применение в различных отраслях: авиационной, аэрокосмической, автомобильной, биомедицинской и машиностроительной благодаря своей способности создать изделие практически любой формы на одном оборудовании [1]. Это позволяет сильно ускорить и удешевить процесс создания изделий. Однако изделия вышедшие из 3D-принтера не всегда являются готовым продуктом и требуют последующей обработки, так как повышение точности поверхности изделий, полученных аддитивными технологиями, увеличит их производительность, уменьшит экономические затраты [2].

Актуальным вопросом в производстве изделий, созданных аддитивными технологиями, является влияние структуры напечатанного материала на процесс резания, так как после печати изделию необходима последующая обработка: изменение формы и размеров, снятие поддерживающих конструкций, изменение геометрии.

Из-за особенностей создания структуры при 3D-печати существует анизотропия материала вследствие послойного создания детали, внутренние остаточные напряжения из-за нагрева материала лазером и быстрого охлаждения, наличие внешних опор и дефектов, каждый новый слой наносится на уже обработанный предыдущий, частично переплавляя его [3].

Вследствие послойного нанесения материала, термических циклов, остаточных напряжений происходит появление хрупкости материала, неравномерность распределения твердости, микропустоты, склонность к выкрашиванию. Таким образом, структура представляет собой зоны, которые многократно перекрываются и накладываются друг на друга. Это создает неоднородность свойств в пределах одного объема материала и кардинально отличает структуру материала от однородных прокатных или литых аналогов.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния микроструктурных особенностей образца, полученного методом аддитивного наплавления, на характеристики процесса точения и морфологию образующейся стружки при использовании режущего инструмента из различных материалов.

Соммером и др. было изучено влияние фрезерования на точность обработки материала [4], полученного SLM методом. Им удалось сократить отклонение размеров до 2 микрон путем подбора оптимальных значений фрезерования и инструмента. Однако вопросы, связанные непосредственно с физикой процесса — формированием стружки, силовыми нагрузками, освещены недостаточно.

Материалы и методы. Был проведен ряд экспериментов, изучающих влияние 3D-печатной структуры на процесс резания и формирование стружки.

Были подготовлены образцы с послойным нанесением материала с помощью сварочного аппарата на стальную цилиндрическую заготовку 08X18H10T с начальным диаметром 40 мм и конечным диаметром 45 мм. Угол выращивания $\alpha=8^\circ$ [1] относительно оси заготовки.

Перед обработкой был проведен визуальный анализ наплавленного слоя для подтверждения наличия характерных дефектов (пор, трещин) и неоднородности.

После чего осуществлялось снятие материала на универсальном токарно-винторезном станке 16К20 резцами из быстрорежущей Р6М5 и твердосплавной сталей Т5К10, Т15К6, ВК8, АР10АТ.

Скорость резания $v = 60$ м/мин, подача $S = 0,3$ мм/об и глубина резания $t = 2$ мм.

На рисунке показана схема установки.

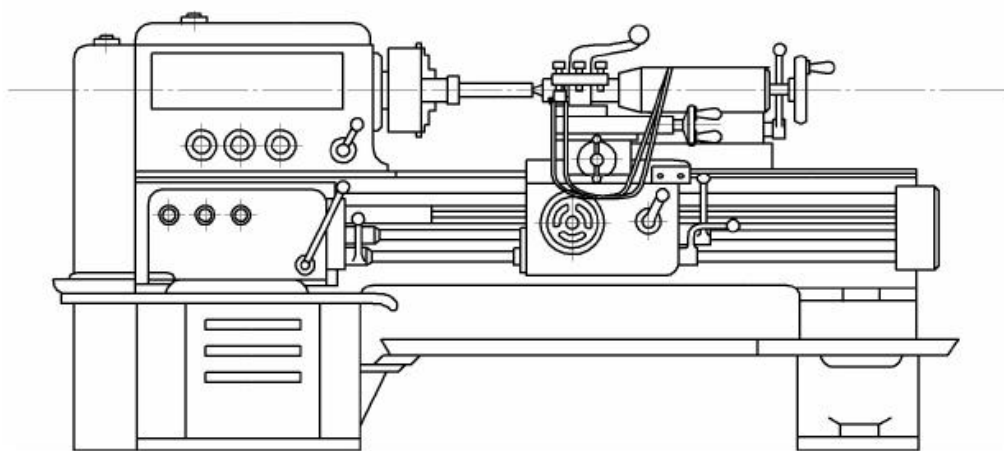


Схема установки

Каждый эксперимент повторялся трижды. Порядок проведения экспериментов рандомизировался.

Параллельно проводился визуальный анализ и классификация типа стружки по общепринятой системе: сливная, суставчатая, элементная, надломленная.

Также фиксировались визуальные признаки износа режущей кромки и наличие вибраций в процессе обработки.

После резания происходил расчет коэффициента усадки стружки по формуле (1):

$$K = \frac{l_0}{l}, \quad (1)$$

где l_0 — длина срезаемого слоя, l — длина стружки.

Результаты измерений коэффициента усадки стружки и визуальной классификации ее типа для каждого инструментального материала сведены в таблицу.

Результаты и обсуждение полученных результатов. Наихудшие результаты продемонстрировали резец из быстрорежущей стали Р6М5 и резец АР10АТ. Высокий коэффициент усадки (8,9 и 12,5 соответственно) свидетельствует о значительной деформации срезаемого слоя перед разрушением.

Для Р6М5 это связано с недостаточной горячей твердостью и износостойкостью: инструмент быстро затупляется, что увеличивает зону пластической деформации и приводит к образованию нестабильной элементной стружки. В случае AP10AT, несмотря на его высокую термостойкость, главным ограничением является низкая ударная вязкость. Инструмент не выдерживает циклических ударных нагрузок, вызванных неоднородностью структуры обрабатываемого материала. Это приводит к интенсивному выкрашиванию режущей кромки и образованию порошкообразной стружки, что является признаком неуправляемого разрушения материала.

Результаты эксперимента

Резец	Коэффициент усадки	Тип стружки
Р6М5	8,9	Элементная, нестабильная
T5K10	7,2	Суставчатая
T15K6	5,8	Сливная, короткая
BK8	4,5	Сливная, длинная
AP10AT	12,5	Надломленная, порошкообразная

Твердые сплавы титано-вольфрамокобальтовой группы T5K10, T15K6 показали удовлетворительные результаты. С уменьшением содержания кобальта и увеличением карбидов титана (переход от T5K10 к T15K6) повышается износостойкость, но несколько снижается прочность. Это отразилось в уменьшении коэффициента усадки с 7,2 до 5,8 и переходе от суставчатой стружки к более благоприятной сливной. Однако процесс оставался не до конца стабильным.

Наилучший результат достигнут при использовании твердого сплава BK8. Наименьший коэффициент усадки (4,5) указывает на минимальную дополнительную деформацию стружки и наиболее эффективное использование энергии резания. Образование длинной сливной стружки свидетельствует о стабильном пластическом течении материала в зоне резания. Это объясняется оптимальным сочетанием свойств сплава BK8: высокой прочностью на сжатие, хорошей ударной вязкостью и высокой теплопроводностью. Последнее свойство способствует эффективному отводу тепла из зоны резания, предотвращая термическое разупрочнение как инструмента, так и обрабатываемого материала. Сплав BK8 успешно гасит ударные нагрузки, вызванные микропустотами и твердыми включениями в наплавленном материале.

Помимо анализа стружки, был проведен сравнительный анализ износа режущей кромки различных инструментов после проведения экспериментов. Для этого использовался портативный USB-микроскоп с увеличением до 200×.

Резец Р6М5: наблюдался интенсивный абразивный износ по задней поверхности и округление режущей кромки, произошло быстрое затупление.

Резец AP10AT: зафиксировано локальное выкрашивание режущей кромки, подтверждающее его хрупкость и неспособность воспринимать ударные нагрузки.

Резцы T5K10 и T15K6: обнаружен равномерный износ по задней поверхности без критических повреждений.

Резец BK8: износ был минимальным и равномерным, наблюдались лишь незначительные следы абразивного воздействия, что коррелирует с наибольшей стабильностью процесса.

Данные наблюдения напрямую подтверждают выводы, сделанные на основе анализа стружки: материал BK8 проявляет наилучшую стойкость при взаимодействии с неоднородной анизотропной структурой.

Результаты показывают, что для обработки анизотропной 3D-печатной структуры наиболее предпочтительны твердые сплавы вольфрам-кобальтовой группы (BK8), обладающие высокой прочностью и ударной вязкостью. Хрупкие материалы и менее стойкие показывают худшие результаты.

Заключение. В рамках данной работы экспериментально установлено, что микроструктурная неоднородность аддитивно наплавленного материала оказывает решающее влияние на процесс стружкообразования и стойкость режущего инструмента. Анизотропия свойств и наличие дефектов приводят к циклическим ударным нагрузкам, что требует от инструментального материала повышенной ударной вязкости.

Список источников

- [1] Куликов М.Ю. и др. Обеспечение качества деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий. *Транспортное машиностроение*, 2020, № 12 (97), с. 4–10.
- [2] Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность. *Новости материаловедения. Наука и техника*, 2015, № 2, с. 11–22.
- [3] Чуканов А.Н. и др. Влияние анизотропии на характер упрочнения в аддитивных сплавах высокой прочности. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*, 2024, т. 14, № 3, с. 19–29.
- [4] Sommer D. et al. Design rules for hybrid additive manufacturing combining selective laser melting and micromilling. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 19, art. no. 5753. <https://doi.org/10.3390/ma14195753>

Б

Энергомашиностроение

Б1

**Теплофизика
энергоустановок
двигателей**

