
Оптимизация подачи при фрезерно-отрезной обработке коррозионностойкой стали 08X18H10T: механизмы износа и стойкость инструмента

А.С. Корытов, М.В. Даниленко

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

Аннотация: В статье экспериментально исследовано влияние подачи на зуб на стойкость твердосплавного инструмента при отрезке коррозионностойкой аустенитной стали 08X18H10T на фрезерно-отрезном станке. Основное внимание уделено анализу механизмов износа инструмента, формированию стружки и явлению наклепа при различных режимах резания. Показано, что парадоксальное снижение подачи с 0.07 мм/зуб до 0.06 мм/зуб усиливает адгезионный износ и ухудшает отведение стружки, что приводит к снижению стойкости инструмента на 5.7% и снижению количества резов на 16–23%. Результаты испытаний подтверждают, что оптимальная подача 0.07 мм/зуб обеспечивает стабильный процесс с абразивным износом и завитой стружкой, увеличивая ресурс инструмента.

Ключевые слова: отрезка, аустенитная сталь 08X18H10T, твердосплавный инструмент, стойкость инструмента, подача на зуб, адгезионный износ, стружкообразование, наклёп, оптимизация режимов резания.

Введение

Аустенитные коррозионностойкие стали, такие как широко распространенная марка 08X18H10T, являются критически важными конструкционными материалами в химической, нефтегазовой, энергетической, пищевой и медицинской промышленности благодаря их выдающейся коррозионной стойкости и удовлетворительным механическим свойствам при повышенных температурах. Однако их обработка резанием сопряжена со значительными трудностями, обусловленными специфическими свойствами: высокой вязкостью, склонностью к интенсивному наклепу (упрочнению) в зоне резания, низкой теплопроводностью и высокой адгезионной активностью по отношению к материалу инструмента. Эти факторы в совокупности приводят к повышенным силам резания, интенсивному тепловыделению, ускоренному

износу режущего инструмента и, как следствие, снижению производительности и увеличению себестоимости обработки

Целью данного исследования является комплексная оценка влияния уменьшения подачи на зуб на стойкость режущего инструмента, скорость его износа и производительность процесса отрезки коррозионностойкой стали 08X18H10T на фрезерно-отрезном станке. Особое внимание уделяется выявлению и анализу физических механизмов износа (абразивный, адгезионный, термическое разрушение), формированию стружки и явлению наклепа, возникающих при данных режимах обработки.

Научная новизна работы заключается в экспериментальном установлении и комплексном обосновании парадоксального снижения стойкости твердосплавного инструмента с покрытием при уменьшении подачи на зуб в процессе отрезки заготовок из коррозионностойкой стали 08X18H10T.

Анализ исследований

Твердосплавные инструменты считаются наиболее подходящим материалом для обработки нержавеющей стали. Однако при прерывистой обработке крупногабаритных деталей из нержавеющей стали твердосплавными инструментами часто возникает серьезная адгезия режущего инструмента и стружки. Адгезия особенно критична при обработке таких материалов, как нержавеющие стали, другие высоколегированные стали и суперсплавы [1]. С точки зрения снижения адгезионного износа, анализ адгезии в процессе обработки имеет большое значение для исследований и промышленности.

Считается, что нержавеющие стали сложнее поддаются механической обработке, чем углеродистые или низколегированные стали [2]. Нержавеющие стали обладают высокой предельной деформацией и

упрочнением. При обработке нержавеющей сталей твердосплавными инструментами физические и механические свойства нержавеющей сталей оказывают значительное влияние на процесс обработки, при этом решающими факторами являются теплопроводность и температура резания [3]. Обработка нержавеющей сталей — это очень сложный процесс, включающий физические взаимодействия, связанные с температурой резания, силой резания, пластической деформацией, трением, высокой скоростью деформации и износом или поломкой инструмента. Из-за высокой пластичности нержавеющей сталей при высокой температуре резания, в процессе обработки нержавеющей сталей возникает высокая сила резания и высокая температура, что приводит к прилипанию материала заготовки к инструменту и сокращает срок службы инструмента [4]. Прилипание происходит при высокой температуре резания и высоком напряжении сжатия.

Низкая скорость теплопередачи и высокая пластичность нержавеющей сталей могут привести к серьёзному явлению налипания в процессе обработки. Высокая адгезия нержавеющей сталей к инструментам способствует прилипанию к режущей кромке в условиях высокоскоростной обработки. При вырезании из-за относительно низкой температуры окружающей среды образуется холодная сварка материала заготовки и инструмента. Следствием прочной связи между инструментом и материалом является образование различных типов переходных и адгезионных слоев в процессе обработки. Во время обработки попеременно возникают адгезия и отрыв, и сильный износ режущей кромки проявляется до того, как инструмент достигнет своего нормального срока службы [5].

В исследовании, представленном в работе [6] показано, что адгезионный износ является основным фактором, приводящим к поломке инструмента при резке нержавеющей сталей твердосплавными

инструментами. При фрезеровании стали температура резания может достигать 800 °С, а сила резания также высока. На поверхности резания имеются микроскопические неровности, что приводит к снижению твердости инструмента из-за образования термомеханической связи. Между инструментом и материалом заготовки легко возникает сродство, что приводит к адгезии. В процессе врезания происходит сцепление инструмента и стружки под воздействием сжимающего напряжения. Затем стружка удаляется под действием растягивающего напряжения в процессе вырубki. Во время удаления стружки в местах сцепления возникают повреждения из-за относительного движения инструмента и стружки, и частицы металла на поверхности инструмента отрываются. Таким образом, возникает адгезионный износ. При чрезмерном адгезионном износе происходит разрушение кромки инструмента, что приводит к поломке инструмента.

Направление повреждения инструмента зависит от распределения нагрузки. При резке с отрицательным углом наклона передней поверхности вероятность разрушения передней поверхности мала, так как передняя поверхность испытывает большее сжимающее напряжение. При резке с положительным углом наклона передней поверхности она подвержена разрушению из-за растягивающего напряжения [7].

Применение оптимального износостойкого покрытия для режущих пластин позволяет повысить точность обработки деталей машиностроения за счёт минимальных деформаций инструмента, увеличить его ресурс, сократить вспомогательное время на замену пластин и достичь экономически эффективных режимов резания, что в целом снизит производственные затраты и улучшит качество продукции [8].

Для обработки торцевых, цилиндрических и плоских поверхностей деталей, предлагается метод, направленный на повышение эффективности

фрезерования, за счёт оптимизации параметров срезаемого слоя. Доказывается, что встречное фрезерование обеспечивает плавное снятие нагрузки с инструмента, а распределение срезаемого слоя между зубьями фрезы при её проектировании снижает суммарную силу резания, уменьшая затраты и увеличивая стойкость инструмента [9].

Для повышения стойкости сменных режущих платин предлагается метод оптимизации угла их крепления в держателе. Доказано, что традиционный угол охвата вызывает опасные прогибы и изгибные напряжения, приводящие к разрушению пластин, а снижения угла до оптимального значения практически устраняет прогибы, значительно снижая напряжения и повышая надёжность инструмента при токарной и фрезерной обработке [10].

Исследование влияние уменьшении подачи на зуб на стойкость режущего инструмента

При обработке коррозионностойкой стали 08X18H10T на стойкость инструмента существенное влияние оказывает подача на зуб. Снижение подачи с 0,07 мм до 0,06 мм при резке заготовок диаметром 188 мм на фрезерно-отрезном станке приводит к уменьшению стойкости режущего инструмента. Это связано с рядом факторов, характерных для резания нержавеющей сталей.

Уменьшение подачи снижает толщину стружки, ухудшая теплоотвод от режущей кромки, что усиливает термическое воздействие на твёрдосплавную пластину. В результате увеличивается тепловая нагрузка и ускоряется разрушение как основы, так и износостойкого покрытия AlCrN. Кроме того, при меньшей толщине срезаемого слоя возрастает площадь контакта между стружкой и передней поверхностью, усиливая фрикционные и адгезионные взаимодействия. Это способствует нарастанию наклёпа,

нестабильности процесса резания, повышению трения и механических нагрузок — особенно при прерывистом резании труб и круглых заготовок.

Ключевым фактором снижения стойкости при малой подаче является рост трения в зоне контакта стружки с инструментом. Формируется тонкая, вытянутая стружка, увеличивающая площадь и длительность контакта, что ведёт к перегреву передней поверхности и ускоренному износу покрытия. Возрастает вероятность образования наклёпа, деформации кромки, вибраций и увеличения сил резания, что ускоряет износ как передней, так и задней поверхности инструмента.

Дополнительным негативным фактором выступает усиленный наклёп обрабатываемого материала. При подаче 0,06 мм/зуб растёт доля упругих деформаций, материал перед кромкой частично упрочняется, создавая барьер для срезания. Это повышает сопротивление резанию, способствует абразивному износу и ускоренному выкрашиванию кромки, особенно при прерывистом резании.

Также при малой подаче формируется прямая, плоская стружка, которая плохо отводится, движется без изгиба, увеличивая контакт с инструментом. Это усиливает трение, перегрев, ускоренный износ покрытия и повышает риск пригорания стружки, особенно при недостаточном охлаждении.

Таким образом, уменьшение подачи с 0,07 до 0,06 мм/зуб при резании стали 08X18H10T ухудшает условия резания за счёт роста трения, тепловой нагрузки, наклёпа и затруднённого отвода стружки, что в совокупности существенно снижает стойкость режущего инструмента.

Для расчёта стойкости и скорости износа твёрдосплавных пластин при отрезке заготовок из стали 08X18H10T дисковой пилой, можно использовать расширенную формулу Тейлора для расчёта скорости резания, которая широко применяется в металлообработке:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v$$

Из данной формулы можно вывести формулу для расчёта стойкости твёрдосплавных пластин для дисковой пилы:

$$T = \left(\frac{C_v \cdot D^q}{v \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Скорость износа твёрдосплавных пластин можно рассчитать через формулу:

$$V_{\text{изн}} = \frac{h_{\text{изн}}}{T}$$

Результаты расчётов приведены в таблице 1.

Как видно из таблиц 1, 2 и рисункам 1 – 4, уменьшение подачи на зуб приводит к уменьшению стойкости режущего инструмента, количества резов, площади реза и увеличению скорости износа:

- при уменьшении подачи на зуб с 0,07 до 0,06 стойкость режущего инструмента снижалась на 5,7%, а скорость износа увеличилась на 5,5%
- при уменьшении подачи с 0,07 до 0,06 при скорости резания 40 м/мин количество резов уменьшается на 16,9%,
- при уменьшении подачи с 0,07 до 0,06 при скорости резания 45 м/мин количество резов уменьшается на 22,7%,
- при уменьшении подачи с 0,07 до 0,06 при скорости резания 50 м/мин количество резов уменьшается на 21,1%.

Скорость резания V , м/мин	Подача на зуб S_z , мм	Стойкость инструмента T , мин	Скорость износа $V_{изн}$, мкм/мин	Время одного реза, мин	Количество резов, шт.	Площадь реза, m^2
40	0,07	195,49	1,02	3,01	62	1,72
45	0,07	145,63	1,37	2,68	54	1,5
50	0,07	111,91	1,79	2,41	46	1,28
40	0,06	184,97	1,08	3,51	53	1,46
45	0,06	137,79	1,45	3,12	44	1,22
50	0,06	105,88	1,89	2,81	38	1,04

Таблица 1 – Результаты расчёта стойкости инструмента, скорости.

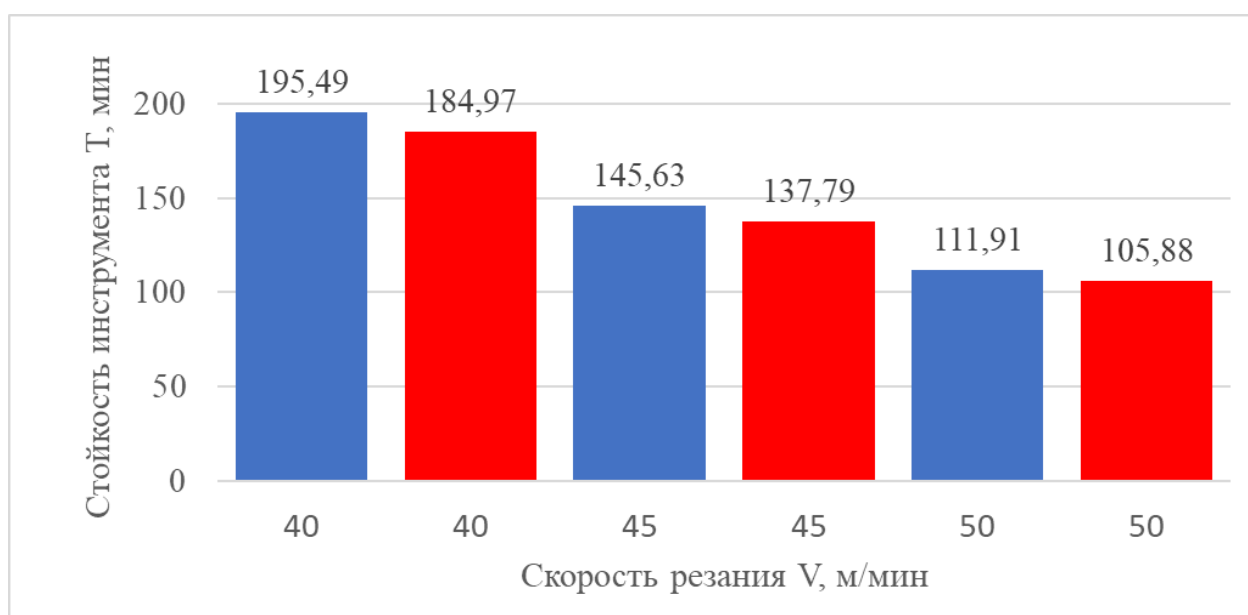


Рисунок 1 – Стойкость в зависимости от скорости резания (синим указано при подаче на зуб 0,07, красным при подаче на зуб 0,06).

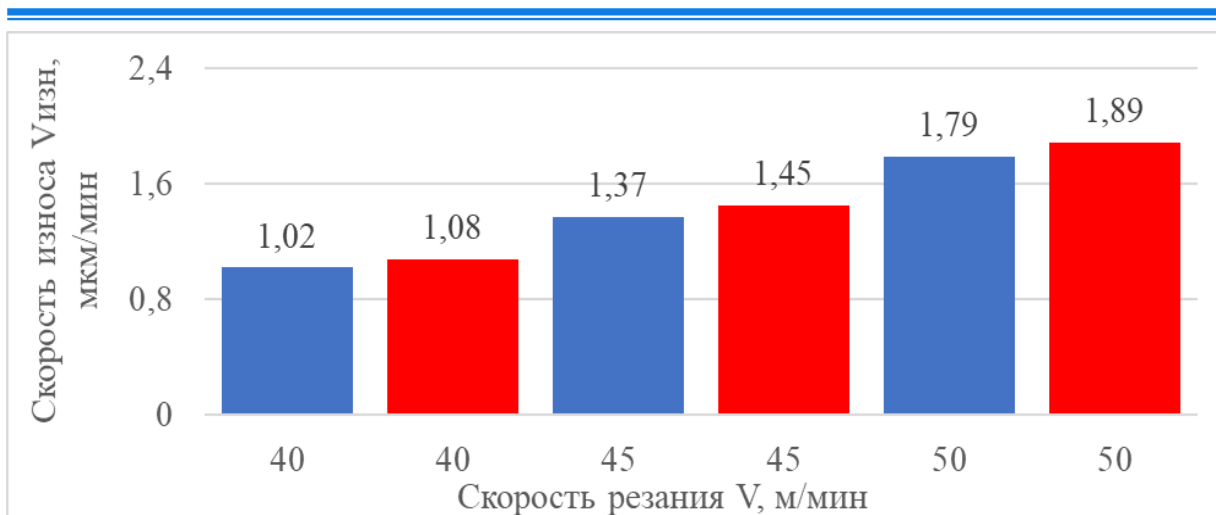


Рисунок 2 – Скорость износа в зависимости от скорости резания (синим указано при подаче на зуб 0,07, красным при подаче на зуб 0,06).

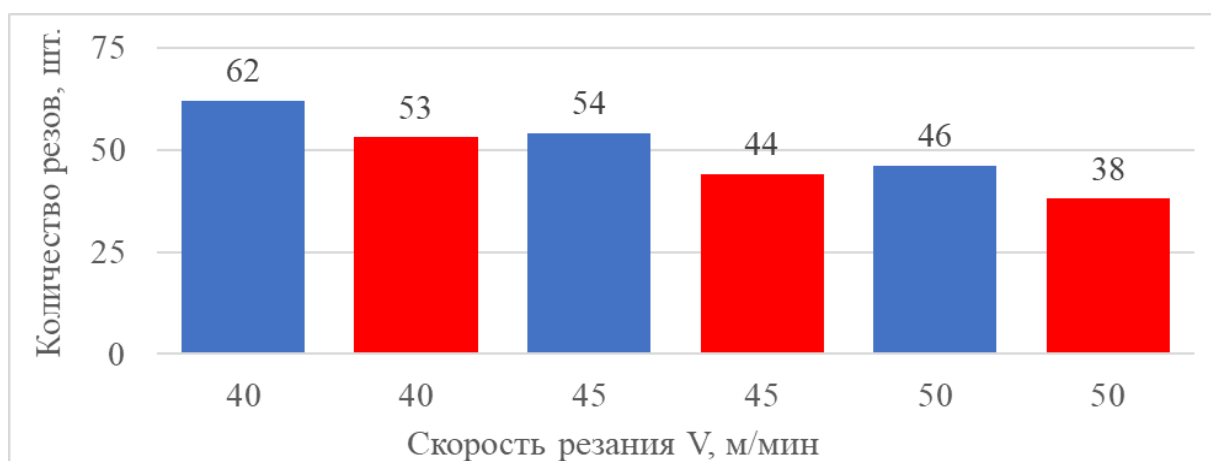


Рисунок 3 – Количество резцов в зависимости от скорости резания (синим указано при подаче на зуб 0,07, красным при подаче на зуб 0,06).

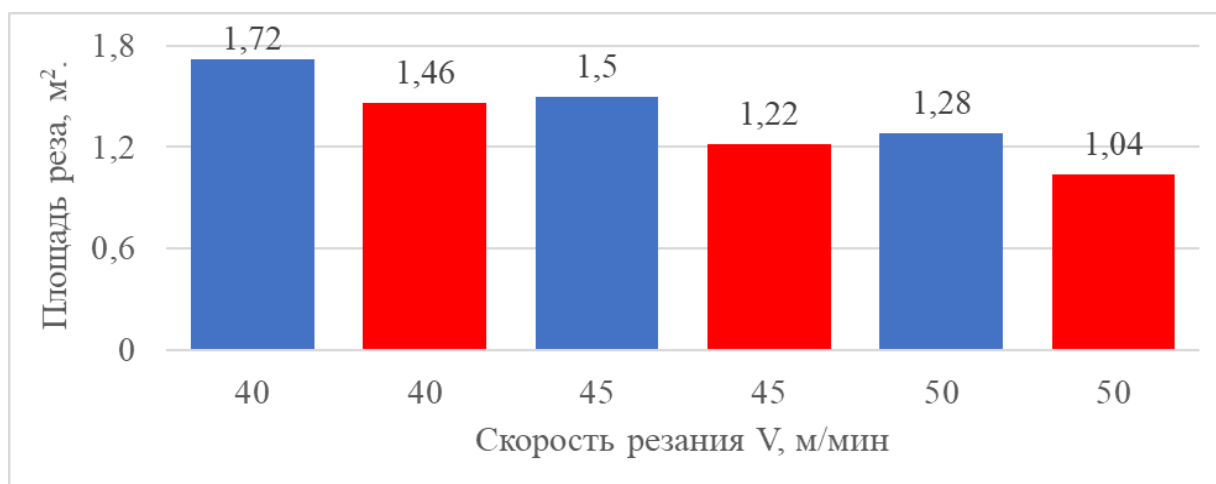


Рисунок 4 – Площадь реза в зависимости от скорости резания (синим указано при подаче на зуб 0,07, красным при подаче на зуб 0,06).

В таблице 2 приведены значения полученные в ходе испытаний на оборудовании, которые подтверждают корректность расчётов.

Скорость резания V , м/мин	Подача на зуб s_z , мм	Количества резов, шт	Площадь реза, m^2
40	0,07	61	1,69
45	0,07	53	1,47
50	0,07	45	1,25
40	0,06	54	1,50
45	0,06	45	1,25
50	0,06	39	1,08

Таблица 2 – Результаты, полученные во время испытаний на оборудовании.



Рисунок 5 - Фотографии стружки при порезке заготовок при подаче на зуб 0,07мм.

На рисунке 5, представлены фотографии стружки при подаче на зуб 0,07 мм. Такая стружка образуется при сбалансированном сочетании скорости, подачи и глубины резания, что обеспечивает равномерное деформирование материала без излишних нагрузок на инструмент. Завитая непрерывная стружка свидетельствует о хорошем отводе тепла, отсутствии вибраций и налипания, что в целом говорит о стабильном процессе обработки с минимальным износом инструмента и высоким качеством поверхности заготовки.



Рисунок 6 - Фотографии износа твёрдосплавных пластин при порезке заготовок при подаче на зуб 0,07мм.

На фотографии износа (рисунок 6) твердосплавного инструмента при обработке стали 08X18H10T с подачей 0,07 мм/зуб наблюдается абразивный износ, что является типичным для оптимальных режимов резания. Этот вид износа проявляется в виде равномерного выкрашивания и затупления режущей кромки без значительных вырывов или пластической деформации, что подтверждает правильность выбранных параметров обработки. Абразивный износ возникает из-за воздействия твердых включений в материале (карбидов, оксидов) и характерен для аустенитных нержавеющей сталей, которые отличаются высокой вязкостью и склонностью к наклепу. При оптимальных режимах (умеренная скорость резания, малая подача, эффективное охлаждение) такой износ развивается постепенно, обеспечивая стабильный процесс резания.



Рисунок 7 - Фотографии стружки при резке заготовок с подачей на зуб 0,06мм.

При подаче на зуб 0,06 мм, во время обработки стали 08X18H10T стружка формируется в виде незавивающейся ленты, что указывает на недостаточную пластическую деформацию в зоне резания и может привести к ряду негативных последствий. Во-первых, лентовидная стружка хуже отводит тепло из зоны резания, поскольку её тонкое сечение снижает эффективность теплоотвода, что способствует локальному перегреву режущей кромки и ускоренному износу инструмента. Во-вторых, такая стружка плохо удаляется из зоны резания, что может приводить к её попаданию в зону резания. В-третьих, из-за повышенного трения и адгезионных свойств аустенитной стали 08X18H10T тонкая стружка склонна к налипанию на режущую кромку, что может спровоцировать адгезионный износ режущего инструмента. Всё это в совокупности снижает стойкость инструмента (рисунок 8).



Рисунок 8 - Фотографии стружки, попавшей в зону резания при резке заготовок при подаче на зуб 0,06мм.

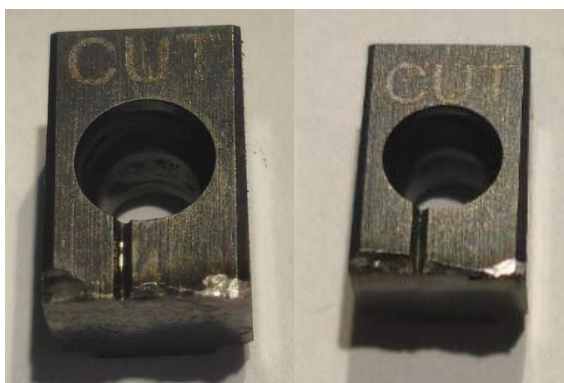


Рисунок 9 – Фотографии износа твёрдосплавных пластин при резке заготовок с подачей на зуб 0,06мм.

На рисунке 9, представлены фотографии твёрдосплавных пластин, используемых при обработке стали 08X18H10T с подачей 0,06 мм/зуб. Наблюдается сильный адгезионный износ, вызванный комбинацией низкой подачи и специфических свойств аустенитной стали: малая толщина стружки увеличивает трение и контактную температуру в зоне резания, что провоцирует интенсивное налипание материала заготовки на режущую кромку; это приводит к вырыванию частиц твёрдого сплава из-за адгезионного сцепления и локального схватывания, формируя характерные кратеры и неравномерные выщерблины на передней поверхности инструмента. В результате ухудшается отвод тепла (налипший слой действует как теплоизолятор), усиливаются вибрации, снижается качество обработанной поверхности, а ресурс пластины сокращается в разы из-за ускоренного разрушения режущей кромки.

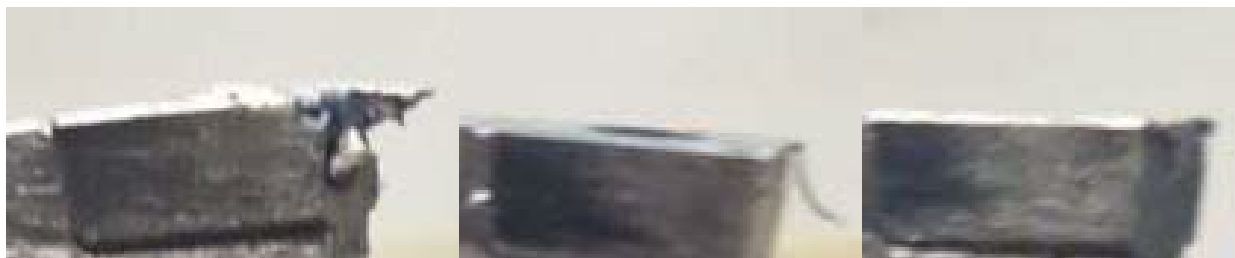


Рисунок 10 – Фотографии налипания металла на режущую кромку твёрдосплавных пластин при резке заготовок с подачей на зуб 0,06мм.

Результаты исследования

Основываясь на представленных данных, можно сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Негативное влияние снижения подачи на стойкость инструмента. Уменьшение подачи на зуб с 0,07 мм до 0,06 мм при обработке коррозионностойкой стали 08X18H10T приводит к существенному снижению стойкости режущего инструмента (на 5,7%) и увеличению

скорости его износа (на 5,5%). Это подтверждается как расчетами стойкости (Т) и скорости износа ($V_{изн}$), так и визуальным анализом износа пластин.

2. Физические причины ухудшения условий резания при малой подаче:

- усиление трения и тепловыделения: уменьшение толщины стружки ухудшает отвод тепла от режущей кромки, повышает температуру в зоне резания и увеличивает площадь/время контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Это интенсифицирует трение;

- адгезионный износ и налипание: повышенное трение и температура провоцируют интенсивное налипание (адгезию) обрабатываемого материала на режущую кромку, что является основной причиной износа при подаче 0,06 мм/зуб. Налипший слой вырывает частицы твердого сплава, образуя кратеры и трещины;

- наклеп обрабатываемого материала: малая подача способствует поверхностному упрочнению (наклепу) материала перед режущей кромкой. Упрочненный слой увеличивает сопротивление резанию и действует как абразив, ускоряя износ кромки;

- плохой стружкоотвод: при подаче 0,06 мм/зуб образуется прямая, ленточная стружка, которая плохо завивается и удаляется из зоны резания. Это повышает риск ее повторного попадания под режущую кромку, способствует налипанию и ухудшает охлаждение;

Визуальное подтверждение (фото):

- при подаче 0,07 мм/зуб стружка имеет правильную завитую форму, а износ пластин преимущественно абразивный, что характерно для стабильного процесса резания;

- при подаче 0,06 мм/зуб стружка формируется в виде прямой ленты, часто попадает обратно в зону резания. На пластинах наблюдается сильный адгезионный износ с налипанием материала, кратерами и трещинами, что

подтверждает дестабилизацию процесса и ускоренное разрушение инструмента.

Заключение

Снижение подачи на зуб с 0,07 мм до 0,06 мм при отрезке коррозионностойкой стали 08X18H10T на фрезерно-отрезном станке является нецелесообразным. Несмотря на интуитивное ожидание уменьшения нагрузки, оно приводит к комплексному ухудшению условий резания: резко возрастает тепловая и механическая нагрузка на инструмент из-за усиления трения, наклепа и плохого стружкоотвода. Это проявляется в смене механизма износа с абразивного на преимущественно адгезионный, что влечет за собой существенное снижение стойкости инструмента (на ~5.7%), ускорение его износа (на ~5.5%) и значительное падение производительности процесса (уменьшение количества резов на 16-23%). Оптимальной для обеспечения максимальной стойкости инструмента и производительности в данных условиях является подача на зуб 0,07 мм.

Литература

1. Deng J., Zhou J., Zhang H., Pei Y. Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels. *Wear*. 2011. Vol. 270. Pp. 520-527.
2. Bermingham M., Damon K., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear*. 2015. Pp. 328-329.
3. Jerold B., Pradeep kumar M. Machining of AISI 316 Stainless Steel Under CarbonDioxide Cooling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27.
4. Broniszewski K., Wozniak J., Kostecki M., Czechowski K., Jaworska L., Olszyna A. Al₂O₃-V cutting tools for machining hardened stainless steel.

Ceramics International. 2015. Vol. 41. Pp. 14190-14196.

5. Liew W.Y. Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions. Wear. 2010. Vol. 269. Pp. 617-631.

6. Zhang C., Zhou L. Modeling of tool wear for ball end milling cutter based on shape mapping. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2012. Vol. 7. Pp. 171-181.

7. Abou-El-Hossein K., Yahya Z. High speed end milling of AISI 304 stainless steel using new geometrically developed carbide inserts. Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 162-163. Pp. 296-602.

8. Темпель Ю.А., Темпель О.А., Сартакова Д.А. Повышение точности металлообработки деталей нефтегазового машиностроения за счет выбора рационального износостойкого покрытия режущего инструмента // Инженерный вестник Дона. 2023. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8853.

9. Иванов Ю.В., Скорская Ю.Н. Исследование характера изменения параметров срезаемого слоя при фрезеровании специальной фрезой // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5367.

10. Барбышев Б.В., Некрасов Р.Ю., Кокорин И.Н., Долгушин В.В. Анализ методики снижения внутренних напряжений в сменных режущих пластинах // Инженерный вестник Дона. 2022. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7546.

References

1. Deng J., Zhou J., Zhang H., Pei Y. Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels. Wear. 2011. Vol. 270. Pp. 520-527.

2. Bermingham M., Damon K., Dargusch M.S. A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear*. 2015. Pp. 328-329.
3. Jerold B., Pradeep kumar M. Machining of AISI 316 Stainless Steel Under CarbonDioxide Cooling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27.
4. Broniszewski K., Wozniak J., Kostecki M., Czechowski K., Jaworska L., Olszyna A. Al₂O₃–V cutting tools for machining hardened stainless steel. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Pp. 14190-14196.
5. Liew W.Y. Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions. *Wear*. 2010. Vol. 269. Pp. 617-631.
6. Zhang C., Zhou L. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IIJDeM)*. 2012. Vol. 7. Pp. 171-181.
7. Abou-El-Hossein K., Yahya Z. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 162-163. Pp. 296-602.
8. Tempel Y.A., Tempel O.A., Sartakova D.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2023. N.12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8853.
9. Ivanov Y.V., Skorskaya Y.N. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2018. N.4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5367.
10. Ivanov Y.V., Skorskaya Y.N. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. N.3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7546.

Дата поступления: 7.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025