

ВЛИЯНИЕ ОСТРОТЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОБРАБОТКУ СТАЛИ 07X16H4B

Качество обработки сталей в промышленности характеризуется множеством параметров (например, наличием микровырывов, чешуек и наплывов, уровнем шероховатости и т.д.). На данные параметры влияют такие факторы, как режимы резания (скорость резания, подача и глубина), параметры технологического оборудования и характеристики режущего инструмента (геометрия режущей части, упрочняющее покрытие, острота лезвия). Цель работы — исследование обработанной поверхности коррозионно-стойкой стали 07X16H4B инструментом, заточенным классическим и высокоскоростным способами. Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи: изготовлен и заточен концевой твердосплавный режущий инструмент; проведены испытания режущего инструмента на стали 07X16H4B; был проведен контроль качества обработанной поверхности. Представлены результаты экспериментов по лезвийной обработке нержавеющей стали инструментом с различной остротой лезвия. На основе данных результатов сделаны выводы о том, что наилучший результат обработки высокопрочной коррозионно-стойкой стали марки 07X16H4B получен инструментом, заточенным высокоскоростным способом, с остротой лезвия $\rho = 3...5$ мкм. Полученные результаты работы позволяют обосновать рекомендации по требуемой остроте твердосплавного режущего инструмента, применяемого при обработке высокопрочных труднообрабатываемых сталей.

Ключевые слова: обработка коррозионно-стойкой стали, острота лезвия, высокоскоростное затачивание.

Введение. Одной из тенденций в развитии изготовления прецизионных деталей является мелкогабаритная обработка. Однако, как показано в работе [1], уменьшение номинальных размеров геометрических элементов обязательно приводит к уменьшению допусков, что, в свою очередь, приводит к усложнению их выполнения. Несмотря на то, что существуют технологии производства, которые позволяют непосредственно создавать необходимую геометрию детали (например, порошковая металлургия, 3D-печать), особые геометрические особенности (например, резьба, мелкие канавки, скрещенные отверстия) или недостаточные свойства материала (например, проблемы структурной целостности и однородности), также вызывают трудности при изготовлении деталей [2–4]. Строгие требования к деталям делают некоторые мелкие чистовые операции сложновыполнимыми. Эффективно такие операции можно реализовать на практике с помощью мелкогабаритной лезвийной обработки [5–7].

Именно поэтому механическая обработка резанием, благодаря эффективности, относительной

простоте и универсальности, по-прежнему считается ведущим методом формирования деталей.

Несмотря на все вышесказанное, в мелкогабаритной лезвийной обработке существует еще множество нерешенных вопросов. Например, несмотря на то, что в настоящее время существуют металлорежущие станки, позволяющие позиционировать инструмент с точностью до 5 мкм, оснастка, обеспечивающая точность базирования инструмента до 3 мкм, и металлорежущий инструмент с биением кромок не более 4–5 мкм, сама лезвийная обработка с такой точностью вызывает значительные проблемы.

Одной из таких проблем является необходимость обеспечения остроты лезвия твердосплавных инструментов. В работе [8] автор пишет, что для надежной работы с точностью до 5 мкм твердосплавные инструменты необходимо изготавливать с условным вписанным радиусом округления лезвия $\rho = 3...5$ мкм и шероховатостью поверхностей режущего клина не более $Ra = 0,2$ мкм. Данную остроту автор предлагает получать методом высокоскоростного затачивания. Для достижения данной

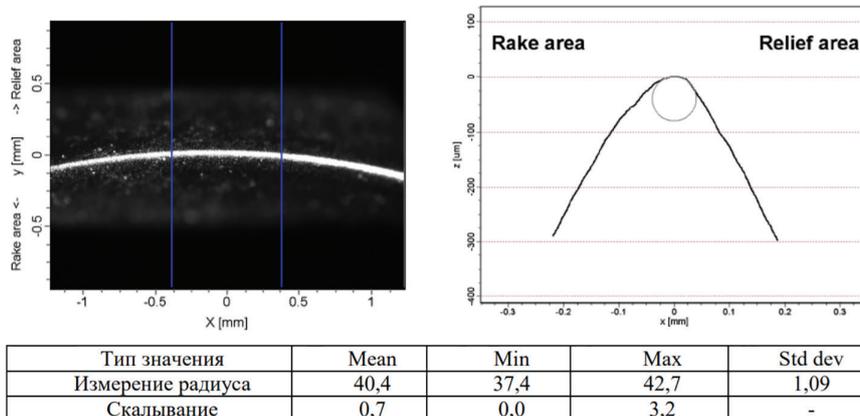


Рис. 1. Результаты измерения остроты лезвия твердосплавной пластины для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов в состоянии поставки

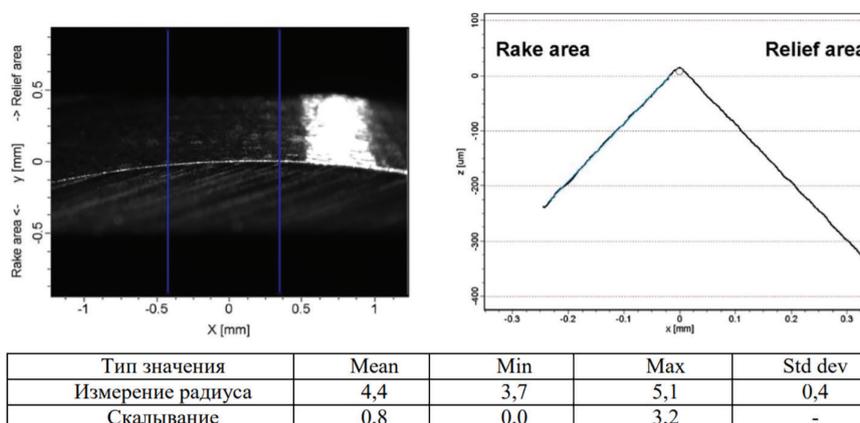


Рис. 2. Результаты измерения остроты лезвия твердосплавной пластины для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов после затачивания при $V = 400$ м/с

цели была создана специальная высокоскоростная установка на базе шлифовально-заточного станка на базе ВЗ-326Ф4, способная производить обработку со скоростями до 400 м/с, за счет шпинделя St-140-40/7.5с. Технологическая система реализует сверхскоростной способ затачивания [9, 10]. На рис. 1 представлены результаты измерения остроты лезвия твердосплавного инструмента для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов в состоянии поставки. На рис. 2 представлены результаты измерения остроты лезвия для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов, полученные автором при скорости затачивания 400 м/с.

Как видно из рис. 2 и 3, при повышении скорости затачивания острота лезвия металлорежущего инструмента повышается, то есть уменьшается условный вписанный радиус округления лезвия с 15...30 до 3...5 мкм, что, в свою очередь, увеличивает режущую способность данного инструмента [11, 12]. Повышение режущей способности приводит к улучшению параметров процесса обработки: снижению сил резания и температуры в зоне резания, вибраций, повышению качества обработки.

Не последнюю роль данный эффект играет при обработке труднообрабатываемых материалов [13–16]. Одним из таких материалов является высокопрочная коррозионно-стойкая сталь марки 07X16H4Б, применяемая для высоконагруженных деталей изделий судового машиностроения, работа-

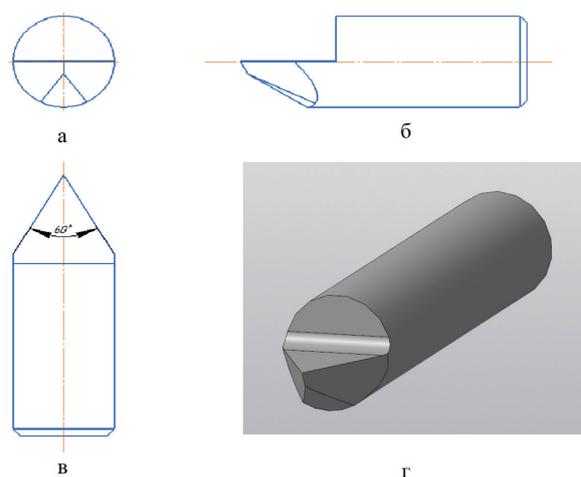


Рис. 3. Геометрия специально изготовленного инструмента (а — вид спереди, б — вид сбоку, в — вид сверху, г — 3D модель)

ющих, в контакте с водой и паром при температуре до 350 °С, а также для изготовления крепежных деталей фланцевых соединений атомных энергетических установок.

Нержавеющую сталь начали обрабатывать с начала 1900-х годов, однако и по сей день этот процесс представляет трудности. Особенности коррозионно-

стойких сталей, затрудняющих их механическую обработку резанием, были изучены и описаны отечественными учеными-материаловедами еще во второй половине прошлого века. Они объясняли эту проблему следующими факторами:

1. Высокая склонность к деформационному упрочнению в процессе резания.

Резкое возрастание прочности сталей аустенитного класса в процессе пластической деформации объясняется особенностями строения кристаллической решетки γ -фазы. При этом происходит наклеп аустенита и выделение из него углерода и карбидообразующих легирующих элементов с образованием дисперсных карбидов (дисперсионное упрочнение). В дополнение к этому немаловажную роль в упрочнении играет полиморфное (так называемое фазовое) превращение. При интенсивных деформациях оно протекает по бездиффузионному механизму и приводит к формированию гетерофазной структуры стали в результате появления в аустенитной матрице высокодисперсных кристаллов мартенсита (α или ϵ , либо обеих фаз одновременно), способных «наследовать» дефекты аустенита. При этом отмечается тесная зависимость между уровнем упрочненного состояния нестабильных аустенитных сталей и объемной долей возникающего мартенсита деформации. Таким образом, повышение прочности аустенитных сталей обусловлено в том числе увеличением объема дефектов γ -твердого раствора и возникшего мартенсита деформации.

2. Большинство коррозионно-стойких сталей имеют низкую теплопроводность.

Низкая проводимость тепла нержавеющей сталей приводит к возникновению высоких температур в зоне их обработки — в 2–3 раза больших, чем при обработке обычных конструкционных сталей.

Такие высокие температуры способствуют развитию адгезии и диффузии в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью. Это вызывает интенсивное схватывание обеих контактных поверхностей друг с другом и приводит к разрушению режущей кромки инструмента [17].

Недостаточное отведение тепла при обработке нержавеющей сталей, особенно аустенитного класса, обуславливает необходимость снижения скорости резания по сравнению со скоростью резания углеродистых сталей.

Важное значение при этом приобретает использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Поэтому для эффективного теплоотведения из зоны резания и улучшения обрабатываемости детали современное оборудование для металлообработки оснащается системами подачи СОЖ напорной струей или через каналы в теле режущего инструмента.

3. Наличие твердых мелкодисперсных карбидов и интерметаллидов в вязкой аустенитной матрице.

Карбиды и интерметаллиды значительно тверже аустенитной матрицы. Такие мелкодисперсные твердые включения в (аустенитных) нержавеющей сталях действуют на рабочие части инструмента как абразив, приводя к его быстрому износу. Эта особенность вызывает необходимость применять для режущего инструмента материалы, которые имеют наряду с высокой прочностью также и повышенную износостойкость.

4. Способность коррозионно-стойких сталей сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах.

Нержавеющие стали, как правило, сохраняют высокие механические свойства даже при высоких температурах, возникающих при их обработке. Это приводит к высоким удельным нагрузкам на инструмент в области контакта с поверхностью обрабатываемой детали. Особенно эта проблема возникает при обработке жаропрочных и жаростойких сталей.

5. Низкая виброустойчивость движения резания.

Этот эффект объясняется интенсивным упрочнением нержавеющей сталей, описанным в п. 1, при неравномерной степени интенсивности этого процесса. Возникновение вибраций приводит к переменным силовым и тепловым нагрузкам на рабочие поверхности инструмента и, следовательно, к микро- и макровыкрашиваниям режущей кромки. При воздействии вибраций особенно неблагоприятное влияние на износ инструмента оказывает явление схватывания стружки с его передней поверхностью.

В теории данные проблемы должны решаться инструментом с более острыми режущими кромками, которые будут позволять избегать образования нароста и самоупрочнения стали.

Постановка задачи. Целью исследования является изучение процессов, протекающих при мел-

Таблица 1

Химический состав в % материала 07X16H4B согласно ГОСТ 5632-72

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Nb
0,05–0,1	до 0,6	0,2–0,5	3,5–4,5	до 0,02	до 0,025	15–16,5	0,2–0,4

Таблица 2

Механические свойства при $T=20$ °C материала 07X16H4B

Сортамент	Размер	Напр.	σ_b	σ_T	δ_5	ψ	KCU	Термообр.
—	мм	—	МПа	МПа	%	%	кДж / м ²	—
Поковки, ГОСТ 25054-81	до 600	Прод.	882	690	11–14	40–55	590–880	Закалка и отпуск

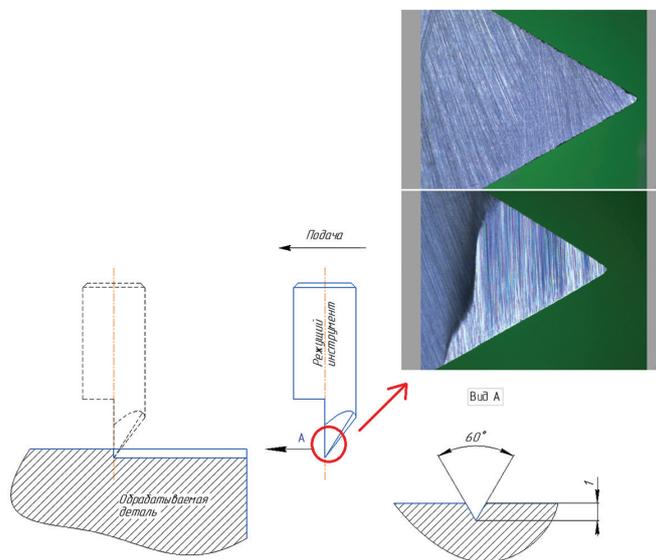


Рис. 4. Общая схема эксперимента

коразмерной лезвийной обработке стали 07X16H4Б заточенным высокоскоростным способом инструментом. Задачи работы: изготовление и заточка концевой твердосплавного режущего инструмента, проведение испытаний режущего инструмента на стали 07X16H4Б; контроль качества обработанной поверхности.

Методика экспериментального исследования. Эксперимент проводился следующим образом. В качестве обрабатываемого материала была выбрана пластина из стали 07X16H4Б, химический состав и основные свойства которой представлены в табл. 1 и табл. 2.

Пластину устанавливали прижимами на стол фрезерного станка с ЧПУ КФПЭ-250 и при помощи специально изготовленного инструмента, геометрия которого представлена на рис. 3, производили обработку канавки V-образной формы [18]. Общая схема эксперимента представлена на рис. 4.

Эксперимент проводился в 2 этапа: с инструментом, заточенным классическим способом и способом высокоскоростного шлифования. Подача и глубина резания в обоих случаях была одинакова.

Обсуждение результатов. Результаты обработки инструментом, заточенным классическим способом, показаны на рис. 5. В данном случае процесс обработки представляет собой пластическую деформацию, при которой материал агломерируется по бокам канавки. Этот тип деформации вызывает удаление малого количества материала и характеризуется большими силами резания и высокими температурами. В процессе обработки таким инструментом нарост, образованный вследствие низкой теплопроводности и повышенной самоупрочняемости обрабатываемой стали, препятствует процессу резания. Это приводит к низкому качеству обработанной поверхности, а в некоторых случаях и вовсе к поломке инструмента.

При обработке же инструментом, заточенным высокоскоростным способом, наблюдаются совсем другие результаты, которые представлены на рис. 6. В данном случае наблюдается так называемый процесс «чистого реза» материала. Эффект «чистого реза» можно представить уменьшением деформаций в зоне обработанной поверхности. В данном случае материал не просто «давится», а именно сре-



Рис. 5. Результаты обработки инструментом, заточенным классическим способом

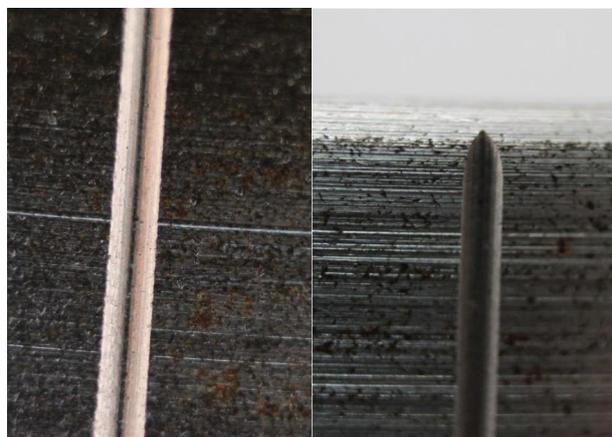


Рис. 6. Результаты обработки инструментом, заточенным высокоскоростным способом

зается. Если в первом случае мы можем наблюдать процесс вырыва зерен обрабатываемого материала, то во втором можно говорить о том, что данные зерна срезаются, не повреждая кристаллическую решетку.

Вывод и заключение. Исходя из полученных результатов проведенных испытаний, можно сделать вывод, что наилучший результат обработки высокопрочной коррозионно-стойкой стали марки 07X16H4Б получен инструментом, заточенным высокоскоростным способом с остротой лезвия $\rho = 3...5$ мкм.

1. Wojciechowski S. The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 89. P. 110–123. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.006.
2. Czampa M., Biró I., Szalay T. A novel machinability test for determining the cutting behaviour of iron-based, carbon-containing and copper-containing powder metallurgy steels (PMS) // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 89 (9-12). P. 3495–3507. DOI: 10.1007/s00170-016-9313-x.
3. Czampa M., Biró I., Szalay T. Effects of different cutting conditions on the surface roughness parameters of iron-copper-carbon powder metallurgy composites // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2017. Vol. 19 (5). P. 440–456. DOI: 10.1504/IJMMM.2017.087617.
4. Czampa M., Markos S., Szalay T. Improvement of Drilling Possibilities for Machining Powder Metallurgy Materials // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 7. P. 288–293. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.049.
5. Mészáros I., Farkas BZs., Keszenheimer A. New cutting edge geometries for high precision hard turning // *Proceedings of 4th CIRP HPC*. 2010. Vol. 2. P. 351–356. ISBN 978-4-915698-03-3.
6. Takács M., Verő B., Mészáros I. Micromilling of metallic materials // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 138 (1-3). P. 152–155. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00064-5.
7. Takács M., Verő B. Actual Feed Rate per Tooth at Micro Milling // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 537-538. P. 695–700. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.695.
8. Реченко Д. С. Повышение эффективности твердосплавного финишного лезвийного инструмента путем сверхскоростного затачивания и разработки комплекса условий его эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2019. 299 с.
9. Пат. 2440229 Российская Федерация, МПК В 24 В 1/00, В 24 В 9/16, В 28 D 5/02. Способ обработки сверхтвердых материалов / Реченко Д. С., Попов А. Ю. № 2010104343/02; заявл. 08.02.10; опубл. 20.01.12, Бюл. № 2.
10. Пат. 2547980 Российская Федерация, МПК В 24 В 3/36. Способ заточки лезвия металлорежущего инструмента шлифовальным кругом / Реченко Д. С., Попов А. Ю. № 2013142129/02; заявл. 13.09.13; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10.
11. Rechenko D. S., Popov A. Yu., Belan D. Yu., Kuznetsov A. A. Hard-alloy metal-cutting tool for the finishing of hard materials // *Russian Engineering Research*. 2017. Vol. 37, Issue 2. P. 148–149. DOI: 10.3103/S1068798X17020162. EID: 2-s2.0-85014890817.
12. Rechenko D. S., Belan D. Yu., Dyundin V. V., Titov Yu. V. High-quality tools in the machining of commutators // *Russian Engineering Research* 2016. Vol. 36, Issue 11. P. 948–950. DOI: 10.3103/S1068798X16110058. EID: 2-s2.0-850039771083/1.
13. Резников Н. И., Бурмистров Е. В., Жарков И. Г. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 200 с.
14. Malekian M., Mostofa M. G., Park S. S. [et al]. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212 (3). P. 553–559. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.022.
15. Woon K. S., Rahman M., Fang F. Z. [et al]. Investigations of tool edge radius effect in micromachining: A FEM simulation approach // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 195 (1-3). P. 204–211. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.137.
16. Woon K. S., Chaudhari A., Rahman M. The effects of tool edge radius on drill deflection and hole misalignment in deep hole gun drilling of Inconel-718 // *CIRP Annals—Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 63 (1). P. 125–128. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.075.
17. Гуревич Я. Л., Горохов М. В., Захаров В. И. [и др.]. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.
18. Куприянов В. А. Мелкоразмерный инструмент для резания труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1989. 136 с.

РЕЧЕНКО Денис Сергеевич, доктор технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 8260-8320

ORCID: 0000-0002-6776-6452

AuthorID (SCOPUS): 25227868500

ResearcherID: D-5096-2014

Адрес для переписки: rechenko-denis@mail.ru

КАМЕНОВ Ренат Уахитович, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 8700-2134

ORCID: 0000-0001-9181-5704

AuthorID (SCOPUS): 57211275221

ResearcherID: B-4846-2018

Адрес для переписки: renatkamenov@mail.ru

БАЛОВА Дарья Георгиевна, аспирантка кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 2419-9533

ORCID: 0000-0002-1552-0039

AuthorID (SCOPUS): 57203342738

ResearcherID: R-1753-2017

АУБАКИРОВА Азиза Кайржановна, студентка гр. КТО-173 машиностроительного института.

SPIN-код: 4965-7601

ЧЕРНЫХ Иван Константинович, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

SPIN-код: 2858-5441

ORCID: 0000-0003-1239-5647

AuthorID (SCOPUS): 57200720534

ResearcherID: D-2489-2019

Для цитирования

Реченко Д. С., Каменов Р. У., Балова Д. Г., Аубакирова А. К., Черных И. К. Влияние остроты режущего инструмента на обработку стали 07X16H4Б // *Омский научный вестник*. 2019. № 6 (168). С. 10–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-10-14.

Статья поступила в редакцию 22.10.2019 г.

© Д. С. Реченко, Р. У. Каменов, Д. Г. Балова, А. К. Аубакирова, И. К. Черных