DOI: 10.34220/2311-8873-2026-10-19

УДК 621.9

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОГО ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЩЕЛЕВЫХ МАТРИЦ НА СТАЛИ 12Х18Н10Т С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

✉[1] **Цуканов Денис Валерьевич,**
к.т.н., заместитель начальника отдела, Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей (филиал акционерного общества «Объединенная двигателестроительная корпорация»), г. Москва, e-mail: d.tsukanov.inc@gmail.com

Зубков Николай Николаевич,
д.т.н., профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

Аннотация. В статье рассмотрено влияние технологических параметров процесса деформирующего резания на геометрические размеры матриц самосмазывающихся поверхностей трения. Исследованы факторы, оказывающие наибольшее влияющие на стабильность процесса деформирующего резания коррозионностойкой аустенитной стали 12Х18Н10Т: предварительная подготовка поверхности, геометрические параметры режущего инструмента и режимные параметры обработки. Установлено, что при подготовке поверхности одновременное увеличение переднего угла и радиуса при вершине режущего инструмента снижает глубину нагартованного слоя при подготовке поверхности перед деформирующим резанием. Анализ экспериментальных данных по варьированию геометрических параметров инструмента показал, что увеличение главного угла

UDC 621.9

DETERMINATION OF PARAMETERS FOR STABLE DEFORMATION CUTTINGFORMING SLOT MATRICES ON AISI 321 STEEL TO CREATE SELF-LUBRICATING SLIDING FRICTION SURFACES

✉[1] **Tsukanov Denis Valerevich,**
candidate of technical sciences, deputy head of department, Research institute for engine manufacturing technology and organization (a branch of the joint stock company "United Engine Corporation"), Moscow, e-mail: d.tsukanov.inc@gmail.com

Zubkov Nikolai Nikolaevich,
doctor of technical sciences, professor in the department of "Tooling equipment and technologies" at Bauman Moscow state technical university, Moscow.

Annotation. The article considers the influence of technological parameters of the deformation cutting process on the geometric dimensions of matrices of self-lubricating friction surfaces. The factors that have the greatest impact on the stability of the deformation cutting process of corrosion-resistant austenitic steel AISI321 are investigated: preliminary surface preparation, geometric parameters of the cutting tool, and operating parameters of processing. It has been found that when preparing the surface, the simultaneous increase in the front angle and radius at the top of the cutting tool reduces the depth of the reinforced layer when preparing the surface before deforming cutting. An analysis of experimental data on the variation of geometric parameters of the tool showed that increasing the main angle in the plan (φ) makes it possible to increase the ratio t/S (cutting depth/feed) of stable deformation cutting: a cutting tool with a main angle in the plan of φ =40.9° makes it possible to obtain

в плане (φ) позволяет повысить соотношение *t/S* (глубина резания/подача) устойчивого деформирующего резания: режущий инструмент с главным углом в плане φ = 40,9° позволяет получать высоту ребер в 1,4 раза превышающих шаг оребрения. Повышение скорости обработки с $V_{рез}$ = 0,49 м/с до $V_{рез}$ = 1,57 м/с без изменения геометрических параметров инструмента позволяет повысить стабильность (по соотношению *t/S*) деформирующего резания в 1,3 раза. Приведены рекомендации по подготовке матриц из стали 12Х18Н10Т деформирующим резанием, позволяющие получать макрорельеф с различным шагом ребер и высотой самосмазывающегося слоя от 0,3 мм до 0,71 мм.

Ключевые слова: ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ РЕЗАНИЕ, САМОСМАЗЫВАЮЩИЕСЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ, НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, ТВЕРДЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ.

a rib height 1.4 times higher than the fin pitch. Increasing the processing speed from V= 0.49 m/s to V= 1.57 m/s without changing the geometric parameters of the tool makes it possible to increase the stability (in terms of the t/S ratio) of deformation cutting by 1.3 times. Recommendations are given for the preparation of matrices made of AISI321 steel by deformational cutting, which make it possible to obtain a macrorelief with different edge pitch and height of the self-lubricating layer from 0.3 mm to 0.71 mm.

Keywords: DEFORMATION CUTTING, SELF-LUBRICATING FRICTION SURFACES, STAINLESS STEEL, SOLID LUBRICANTS, WEAR RESISTANCE, PLAIN BEARINGS.

[1] *Автор для ведения переписки*

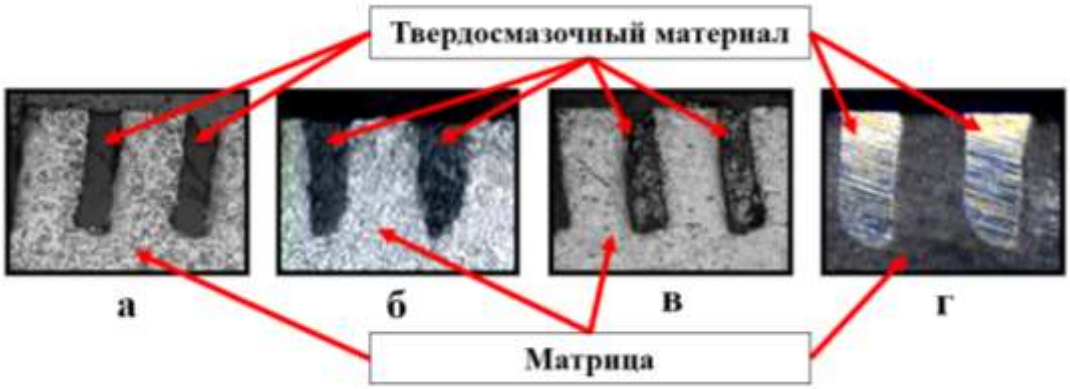
1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Аустенитные коррозионностойкие стали обладают высокой коррозионной стойкостью, вследствие чего широко используются в химической и пищевых промышленностях, атомном и энергетическом машиностроении. Невысокие механические свойства этих сталей, такие как низкая твердость и трибологические характеристики накладывают ограничения на использование подобных материалов в трибосопряжениях. Разработка технологий, которые позволят повысить износостойкость коррозионностойких аустенитных сталей является перспективным направлением для исследований [1, 2].

В работах [3, 4] представлен способ создания самосмазывающихся поверхностей трения на основе матриц, получаемых деформирующим резанием (ДР) с последующим внедрением в полученный макрорельеф твердосмазочных материалов (рис. 1).

При обработке деформирующим резанием происходит подрезание слоя и его последующая пластическая деформация. В процессе обработки ДР за счет пластической деформации из подрезанных слоев, по сути стружки, не отделенной от заготовки по своей узкой стороне, происходит формирование макрорельефа в виде ребер [5]. Схема обработки идентична основным операциям обработки резанием: наружное и внутреннее цилиндрическое точение, обработка конических поверхностей, торцевое точение.

Деформирующее резание позволяет получать на поверхности заготовки макрорельеф в форме ребер, шипов, ячеек и имеет широкую область применения. Формирование развитой поверхности также позволяет повышать надежность торцевых уплотнений [6, 7], повышать износостойкость деталей пар трения [8], повышать поверхностную твердость деталей в процессе обработки [9-11], создавать композиционные материалы, обладающие повышенной износостойкостью и самосмазывающимися свойствами [12, 13].



а) фторопласт (PTFE); *б)* полимеризованная эмульсия Фторопласт+MoS2; *в)* свинец; *г)* медь

Рисунок 1 – Макрорельеф с заполнением твердосмазочным материалом

Варьирование геометрических параметров инструмента позволяет добиться требуемого содержания твердосмазочного материала в структуре поверхности трения [14]. Однако важно учесть, что на стабильность процесса деформирующего резания также оказывается соотношение глубины резания к шагу оребрения (*t/S*): при определенном соотношении *t/S* деформирующее резание утрачивает стабильность – происходит срыв ребра. Актуальной задачей при подготовке деформирующим резанием матриц является определение рациональных параметров технологического процесса ДР для получения заданных геометрических параметров матриц.

Работа посвящена расширению известной области устойчивого ДР на стали 12Х18Н10Т за счет варьирования геометрических параметров инструмента и режимов обработки. Информация об области устойчивого ДР в дальнейшем позволит конструктору назначить оптимальные геометрические параметры поверхности скольжения с учетом глубины самосмазывающего слоя, шага и толщины прослоек твердосмазочного материала, а технологу – снизить время отработки технологии.

Известно, что для реализации ДР на сталях необходимо соблюдение следующих условий: относительное удлинение при разрыве не менее 21 % и твердость не более 220 НВ [15]. Лезвийная механическая обработка стали 12Х18Н10Т сопровождается упрочнением стружки и упрочнением (нагартовкой) обработанной поверхности. На процесс упрочнения оказывают влияние как технологические режимы обработки, так и геометрические параметры используемого инструмента [16].

Нагартовка поверхности при подготовке поверхности под последующее ДР снижает ее пластические свойства, что при малых глубинах ДР может оказывать влияние как на осуществимость ДР, так и на достижение максимальной высоты макрорельефа при минимальных значениях шага оребрения.

В справочной литературе достаточно слабо представлены исследования об упрочнении поверхностного слоя детали после механической обработки. Малое количество источников не дает возможность произвести оценку надежности представленной в них информации. Это вызвало необходимость дополнительного исследования степени и глубины упрочнения поверхности, предназначенной для последующего ДР.

Возможность реализации метода ДР зависит от режимов обработки и геометрических параметров инструмента. Наибольшее влияние на область устойчивого получения макрорельефа в виде оребрения оказывает сочетание глубины резания и подачи (рис. 2) [17].

Зона устойчивого формирования макрорельефа («Зона ДР») лежит между двумя границами. При сочетаниях глубины и подачи, лежащих ниже «ДР», происходит срыв формируемых ребер в виде стружки (рис. 3). При глубине и подаче, лежащих выше «ДР», на поверхности заготовки образуется рельеф в виде впадин треугольного профиля и треугольных выступов металла выдавленного на обрабатываемую поверхность металла. Ребро, имеющее участки с параллельными стенками, не формируется.

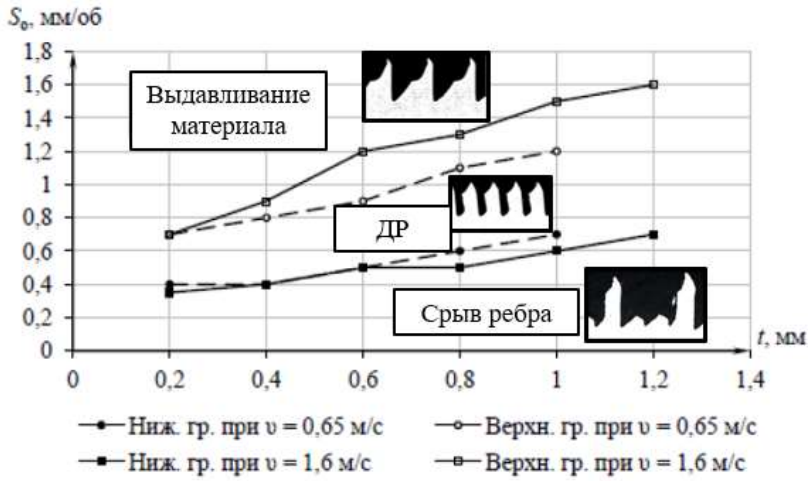


Рисунок 2 – Зоны деформирующего резания

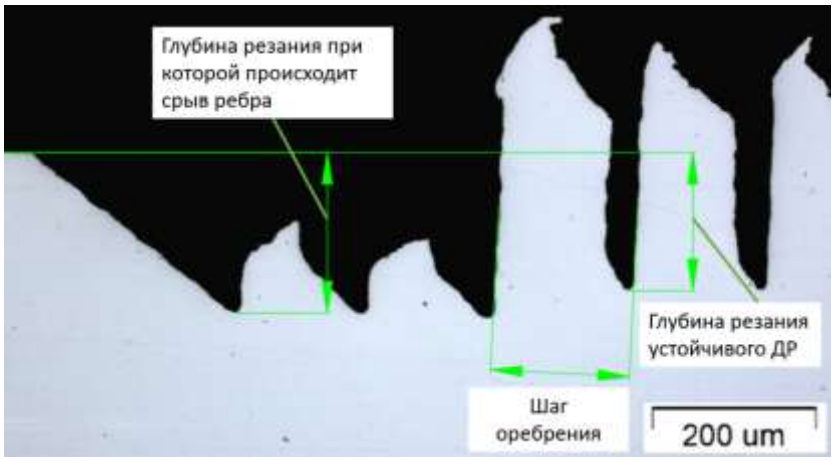


Рисунок 3 – Граница области устойчивого ДР

2 Материалы и методы

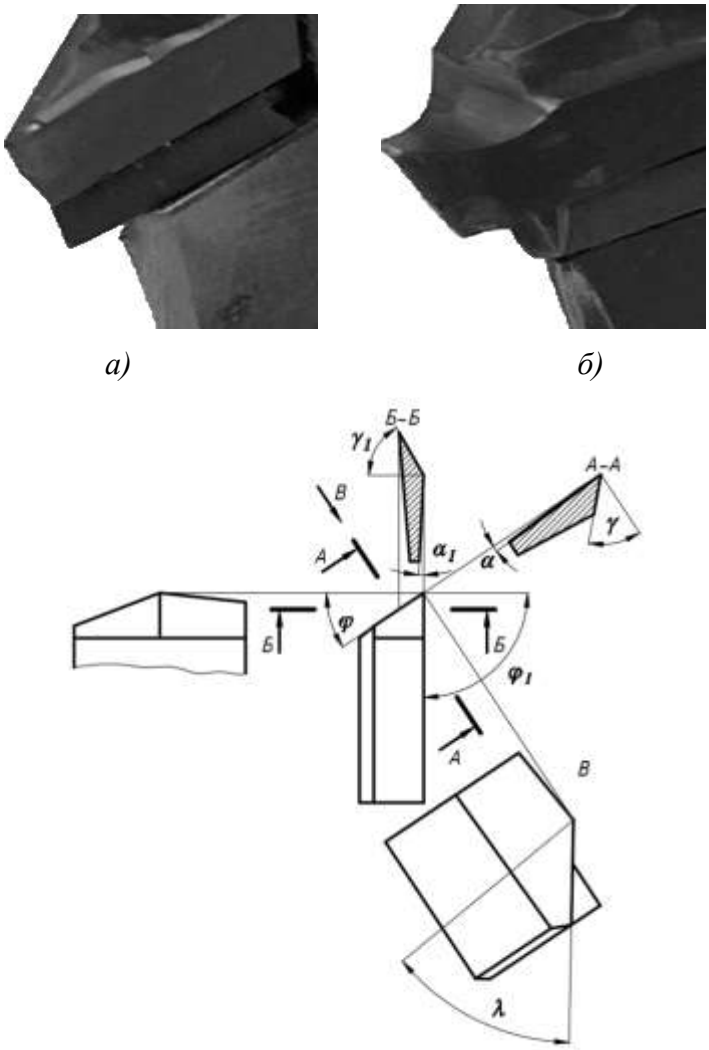
Установочными экспериментами определено, что подготовка поверхности стандартными сменными многогранными пластинами (СМП) часто не обеспечивала устойчивое формирование ребер при малых глубинах резания.

Для определения влияния на степень упрочнения обработанной поверхности геометрических параметров используемого инструмента при подготовке поверхности перед ДР проведена обработка стали 12Х18Н10Т следующими резцами: резец 1 с пластиной СМП типа VCMT160404-HMP NC3030 (рис. 4, а), резец 2 из сплава ВК8 с заточкой на станке.

В качестве заготовки использовалась труба диаметром 20,0 мм с толщиной стенки 2,0 мм из стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки с твердостью 200 НВ. Токарная обработка проводилась при постоянной скорости резания $V = 1{,}05$ м/с, подаче $S_o = 0{,}3$ мм/об и глубине резания $t = 0{,}3$ мм.

Для измерения микротвердости были подготовлены образцы поперечных срезов трубы на электроэрозионном вырезном станке. Запрессовка образцов проводилась на прессе для горячей запрессовки типа Struers CitoPress-20 в эпоксидной смоле DuroFast.

Измерение микротвердости осуществлялось на твердомере типа DuraScan70 индентером в виде алмазной пирамидки с нагрузкой 10 г на расстоянии 50 мкм от поверхности и 200 г – на расстоянии от 80 мкм до 330 мкм с шагом 50 мкм. Значения $HV_{0,01}$ переведены в $HV_{0,2}$ в соответствии с ГОСТ 8.063-2007, где эталонные меры микротвердости имеют одинаковые номинальные значения по шкалам с разными нагрузками в пределах допускаемой погрешности.



а) *б)* *в)*

а) внешний вид режущей части СМП VCMT160404-HMP NC3030 производства Korloy;
б) внешний вид режущей части заточенного резца для чистовой обработки типа «утиный нос» с увеличенным передним углом; *в)* геометрические параметры инструмента для ДР с обозначением углов в соответствии с ГОСТ 25762-83

Рисунок 4 – Резцы, используемые в работе

Геометрические параметры используемого в работе инструмента приведены в табл. 1.

Для определения области устойчивого ДР для стали 12Х18Н9Т были проведены эксперименты на трубной заготовке диаметром 90 мм с толщиной стенки 9,0 мм. Скорости во время экспериментальной работы принимались 0,49 м/с, 0,98 м/с, 1,57 м/с. Заготовка после установки предварительно протачивались для устранения биения и минимизации нагартованного слоя резцом 2.

Подачи при ДР были назначены $S_o = 0{,}2$ мм/об; $S_o = 0{,}3$ мм/об; $S_o = 0{,}4$ мм/об. Начальная глубина резания t принималась равной подаче, длина резания составляла 2,0 мм для каждого участка. В процессе обработки дискретно увеличивали глубину резания на 0,01 мм пока процесс резания не утрачивал стабильность и не происходило срыва ребра. Обработка велась резцами с заточкой, указанной в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрические параметры режущего инструмента для подготовки поверхности под последующее ДР и инструмента для ДР

Геометрические параметры режущего инструмента	Рис. 4, а	Рис. 4, б	Рис. 4, в		
	Резец 1	Резец 2	Резец ДР1	Резец ДР2	Резец ДР3
Главный угол инструмента в плане φ, °	93,0	60,0	37,9	40,9	34,9
Вспомогательный угол инструмента в плане φ_1, °	52,0	60,0	90,0		
Передний угол γ, °	7,0	20,0	46,8		
Главный задний угол α, °	7,0	5,0	3,0		
Вспомогательный задний угол α_1, °	10,0	5,0	3,0		
Радиус при вершине, мм	0,4	0,6	Острозаточенный		
Угол наклона главной режущей кромки λ, °	–	–	53,8		
Передний угол на вспомогательной (деформирующей кромке) γ_1, °	–	–	-60,0		

3 Результаты исследований

На рис. 5 показано изменение твердости материала в зависимости от расстояния до обработанной поверхности на стали 12Х18Н10Т.

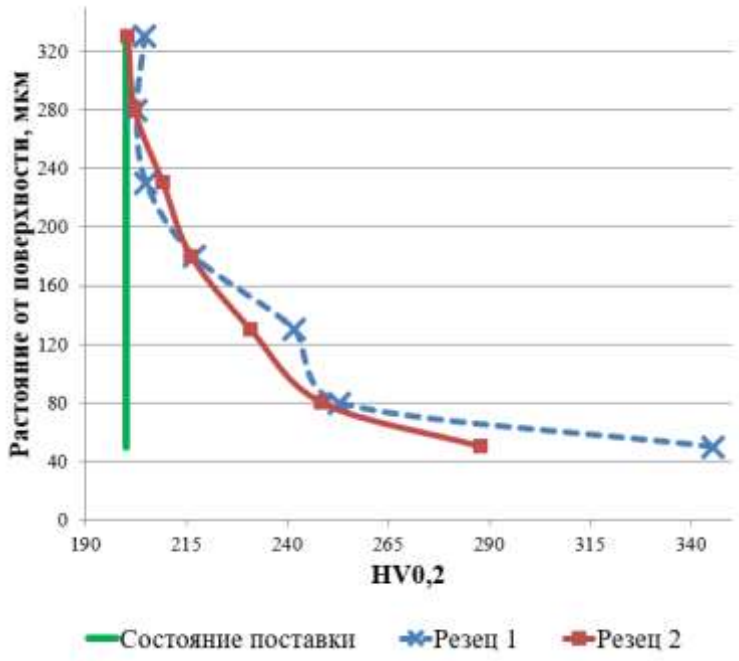


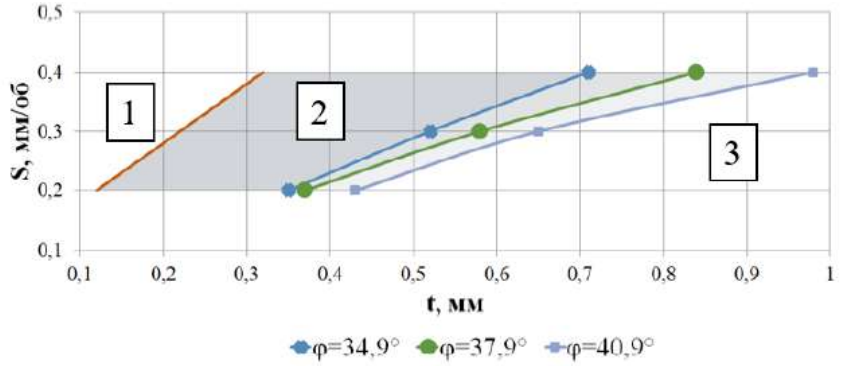
Рисунок 5 – Изменение твердости при удалении от обработанной поверхности

Резец 1 значительно повышает микротвердость материала заготовки на расстоянии до 75 мкм от поверхности обработки, в сравнении с резцом 2, что может повлечь срывы ребра при обработке с малыми значениями глубины резания (t < 0,2 мм). В дальнейших экспериментах для уменьшения влияния нагартовки на процесс ДР подготовка поверхности перед обработкой велась резцом 2.

Результаты экспериментов по определению области устойчивого ДР при варьировании геометрических параметров инструмента представлены на рис. 6, на рис. 7 – в зависимости от скорости резания.

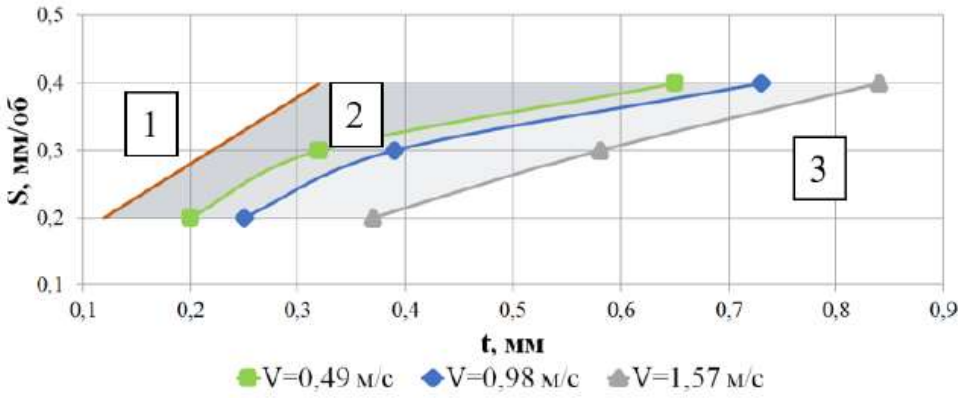
При увеличении главного угла в плане наблюдается увеличение соотношения *t/S*, однако при этом возрастает число отказов инструмента (разрушение при внедрении инструмента на максимальную глубину обработки). При работе инструментом с геометрией заточки ДР1, соответствующей оптимальной геометрии заточки инструмента по сталям разрушений резца не происходило и область существования ДР ограничивалась срывом ребра во время обработки.

Повышение скорости обработки приводит к увеличению допустимого соотношения *t/S*, не приводящего к срыву ребра, соответственно и расширения области устойчивого ДР. Экспериментально установлено, что при скорости резания V = 1 м/с достигается наибольшая стабильность процесса ДР при обработке стали 12Х18Н10Т. При скорости резания V = 0,5 м/с соотношение *t/S* уменьшается.



1 – зона выдавливания материала; *2* – зона ДР; *3* – зона срыва ребра

Рисунок 6 – Область устойчивого ДР при изменении главного угла в плане инструмента



1 – зона выдавливания материала; *2* – зона ДР; *3* – зона срыва ребра

Рисунок 7 – Область устойчивого ДР для инструмента для различных скоростей резания

Уменьшение «зоны ДР» (уменьшение максимально допустимой глубины резания *t*) происходит при скоростях $V_{рез}$, меньших скорости $V_{рез}$ = 1,0 м/с, соответствующей отсутствию срыва ребра. При скорости резания $V_{рез}$ = 1,5 м/с увеличивается соотношение *t/S*, что вызывает расширение «зоны ДР» (увеличение максимально допустимой глубины резания *t*) в сравнении с $V_{рез}$ = 1 м/с, при которой не происходит срыва ребра. Однако при этом растет число отказов инструмента. Также следует отметить, что обрабатываемый материал (сталь 12Х18Н10Т) является труднообрабатываемым, обладающим низкой теплопроводностью. Для него повышение скорости, а также увеличение глубины резания, приводит к значительной интенсификации выделения тепла в зоне резания, что является одной из причин повышенного износа инструмента.

На рис. 8 представлены области выдавливания материала (а), срыва ребра (в) и устойчивого ДР (б).

4 Обсуждение и заключение

Одновременное увеличение переднего угла и радиуса при вершине резца уменьшает глубину нагартованного слоя при обработке резанием: повышение значения переднего угла с 7° до 20° и радиуса при вершине с 0,4 до 0,6 позволило снизить микротвердость на глубине 50 мкм в 1,2 раза при обработке стали 12Х18Н10Т.

С увеличением скорости обработки стали 12Х18Н10Т с $V_{рез}$ = 0,49 м/с до $V_{рез}$ = 1,57 м/с соотношение *t/S*, при котором осуществляется ДР, возрастает в 1,3 раза.



а) *б)* *в)*

а) выдавливание материала; *б)* срыв ребра; *в)* устойчивое ДР

Рисунок 8 – Области ДР

Увеличением главного угла в плане φ при обработке стали 12Х18Н10Т соотношение *t/S*, при котором осуществляется ДР, возрастает от 1,75 (для φ = 39°) до 2,45 (для φ = 45°).

При подготовке матриц из стали 12Х18Н10Т деформирующим резанием при варьировании технологическими параметрами процесса можно получить следующие параметры макрорельфа: для подач *S* = 0,2; 0,3; 0,4 мм/об допустимо назначать глубину резания *t* = 0,43, 0,68 0,98 мм, что после удаления треугольных заострений позволит получить высоту самосмазывающегося слоя 0,3; 0,48 и 0,71 мм соответственно.

Список литературы

1 Habib ur Rehman, M. Naeem, M. Abrar, M. Shafiq, J.C. Díaz-Guillén, Muhammad Yasir, Shahid Mahmood a. Enhancement of hardness and tribological properties of AISI 321 by cathodic cage plasma nitriding at various pulsed duty cycle // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Т. 1002. – С. 175280. – doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175280.

2 Rong Meng, Jianxin Deng, Ran Duan, Yayun Liu, Guiliang Zhang. Modifying tribological performances of AISI 316 stainless steel surfaces by laser surface texturing and various solid lubricants // Optics & laser technology. – 2019. – Т. 109. – С. 401-411. – doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.020.

3 Севальнёв Г.С., Цуканов Д.В., Зубков Н.Н., Дульнев К.В., Севальнёва Т.Г. Повышение триботехнических характеристик аустенитной стали методом деформирующего резания //Металлург. – 2021. – №. 2. – С. 42-47.

4 Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Цуканов Д. В. Деформирующее резание как основа создания самосмазывающихся узлов трения скольжения // Технология металлов. – 2021. – № 5. –С. 37-43. – doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-5-37-43.

5 Zubkov N.N, Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool–workpiece interaction in deformational cutting // Russian Engineering Research. – 2016. – Т 36. № 3. – P. 209-212. – doi.org/10.3103/S1068798X16030217.

6 Подкина Н.С., Зубков Н.Н., Исаев О.Ю., Смирнов Д.В. Использование макрорельефов, полученных деформирующим резанием, для повышения надежности уплотнений из терморасширенного графита // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.Н. Анциферова. – Пермь. – 2018. – С. 475-479.

7 Подкина Н.С., Зубков Н.Н., Исаев О.Ю., Смирнов Д.В. Испытания на герметичность прокладок из терморасширенного графита на металлическом основании, обработанном методом деформирующего резания // Конструкции из композиционных материалов. – 2019. – № 1. – С. 18-20.

8 Зубков Н. Н., Васильев С. Г. Повышение износостойкости деталей пар трения скольжения на основе метода деформирующего резания // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 8. – С. 3-9.

9 Васильев С. Г., Шуляк Я. И. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 11. – С. 77-82.

10 Zhigalina O.M., Degtyareva A.G., Zubkov N.N., Simonov V.N., Vasil'ev S.G. Effect of carbon content on the structure and microhardness of steels under rapid action by deforming cutting Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – Т. 62. № 1-2. –С. 168-173. – doi.org/10.1007/s11041-020-00530-3.

11 Zubkov N., Poptsov V., Vasiliev S., Batako ADL. Steel case hardening using deformational cutting // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – Т. 140. № 6. –С. 061013. – doi.org/10.1115/1.4039382.

12 Zubkov N., Vasil'ev S., Tsukanov D. Deformational Cutting as a Basis for Creating Self-Lubricating Sliding Friction Units // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – Т. 2021. № 13. – С. 1786-1791. – doi.org/10.1134/S0036029521130371

13 Karavaev D.M., Matygullina E.V., Zubkov N.N., Smirnov D.V., Isaev O. Y., Ablyaz T. R. Wear resistance of composites based on expanded graphite and a steel base with structured macroscopic relief // Russian Engineering Research. – 2020. – Т. 40. № 10. – С. 867-869. – doi.org/10.3103/S1068798X20100123

14 Цуканов Д.В., Зубков Н.Н. Управление параметрами оребренной матрицы для размещения в ней твердосмазочных материалов разворотом инструмента для деформирующего резания в основной плоскости // Промышленность и сельское хозяйство. – 2025. – № 12 (91). – С. 87-93.

15 Зубков, Н.Н. Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – № 10. – С. 17-20.

16 Фирсов И.В., Чигиринский Ю. Л. Состояние поверхностного слоя детали после черновой лезвийной обработки стали 45ХН2МФА // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – №. 8. – С. 55-59

17 Васильев С.Г. Разработка метода деформирующего резания для создания упрочняющих композиционных покрытий: дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1996, 223 с.

References

1 Habib ur Rehman, M. Naeem, M. Abrar, M. Shafiq, J.C. Díaz-Guillén, Muhammad Yasir, Shahid Mahmood a. Enhancement of hardness and tribological properties of AISI 321 by cathodic cage plasma nitriding at various pulsed duty cycle // Journal of Alloys and Compounds. 2024, vol. 1002. p. 175280. – doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175280.

2 Rong Meng, Jianxin Deng, Ran Duan, Yayun Liu, Guiliang Zhang. Modifying tribological performances of AISI 316 stainless steel surfaces by laser surface texturing and various solid lubricants // Optics & laser technology. 2019, vol. 109, pp. 401-411. – doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.020.

3 Sevalnev G. S., Tsukanov D. V., Zubkov N. N., Dulnev K. V., Sevalneva T. G. Improving the tribological characteristics of austenitic steel by deforming cutting // Metallurg. 2021, no. 2, pp. 42-47.

4 Zubkov N. N., Vasiliev S. G., Tsukanov D. V. Deforming cutting as a basis for creating self-lubricating sliding friction units // Technology of metals. 2021, no 5, pp. 37-43. – doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-5-37-43.

5 Zubkov N.N, Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool–workpiece interaction in deformational cutting // Russian Engineering Research. 2016, vol. 36, no 3, pp 209-212. – doi.org/10.3103/S1068798X16030217.

6 Podkina N.S., Zubkov N.N., Isaev O.Yu., Smirnov D.V. Using macro-reliefs produced via deforming cutting to enhance the reliability of seals made from exfoliated graphite // Current Problems in Powder Materials Science: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 85th Anniversary of the Birth of Academician V.N. Antsiferov. – Perm. – 2018. – pp. 475–479.

7 Podkina N.S., Zubkov N.N., Isaev O.Yu., Smirnov D.V. Leakage tests of gaskets made of thermally expanded graphite on a metal base processed using the deformation cutting method // Constructions made of composite materials. – 2019. – No. 1. – Pp. 18–20.

8 Zubkov N.N., Vasiliev S.G. Increasing the wear resistance of sliding friction pair parts based on the deformation cutting method // Strengthening technologies and coatings. – 2013. – No. 8. – Pp. 3–9.

9 Vasiliev S. G., Shulyak Ya. I. Changing the hardness of a part's surface by mechanical processing // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. – 2011. – No. 11. – Pp. 77–82.

10 Zhigalina O. M., Degtyareva A. G., Zubkov N. N., Simonov V. N., Vasil'ev S. G. Effect of carbon content on the structure and microhardness of steels under rapid action by deforming cutting Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – T. 62. № 1-2. –C. 168-173. – doi.org/10.1007/s11041-020-00530-3.

11 Zubkov N., Poptsov V., Vasiliev S., Batako ADL. Steel case hardening using deformational cutting // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – T. 140. № 6. –C. 061013. – doi.org/10.1115/1.4039382.

12 Zubkov N., Vasil'ev S., Tsukanov D. Deformational Cutting as a Basis for Creating Self-Lubricating Sliding Friction Units // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – T. 2021. № 13. – C. 1786-1791. – doi.org/10.1134/S0036029521130371

13 Karavaev D. M., Matygullina E. V., Zubkov N. N., Smirnov D. V., Isaev O. Y., Ablyaz T. R. Wear resistance of composites based on expanded graphite and a steel base with structured macroscopic relief // Russian Engineering Research. – 2020. – T. 40. № 10. – C. 867-869. – doi.org/10.3103/S1068798X20100123

14 Tsukanov D.V., Zubkov N.N. Control of the parameters of a finned matrix for placing solid lubricants in it by turning a tool for deforming cutting in the main plane // Industry and agriculture. 2025, no. 12 (91), pp. 87-93.

15 Zubkov, N.N. Combination of cutting and pressure processing processes in a new method of forming developed surface structures // Forging and stamping production. Pressure processing of materials. - 2002. - No. 10. - P. 17-20.

16 Firsov I. V., Chigirinsky Yu.L. The condition of the surface layer of the part after roughing of 45KHN2MFA steel //Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2016. no. 8, pp. 55-59.

17 Vasiliev S. G. Development of a method of deforming cutting to create reinforcing composite coatings: diss. ... cand. of tech. sc. – Moscow; 1996. – 223 p.

© Цуканов Д. В., Зубков Н. Н., 2026