

Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания

Е. В. Артамонов¹, Д. В. Васильев¹✉, М. О. Чернышов¹

¹ ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
ул. Володарского 38, г. Тюмень 625000, Российская Федерация

✉ e-mail: vasilevdv@tyuiu.ru

Резюме

Цель исследования заключается в повышении производительности при резании труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающей геометрии инструмента и режимов резания, обеспечивающих понижение вязких свойств стружки, обрабатываемого материала. В статье рассматриваются проблемы механической обработки деталей нефтедобывающего оборудования на предприятиях Западной Сибири. Представлено основное и главное условие обеспечения дробления стружки. Выявлена проблема малой эффективности существующих в современной промышленности способов, в той или иной мере направляющих, завивающих и стружкодробящих методов.

Методы. Проведено имитационное моделирование, расчет направления и дробления стружки; определены эффективные способы решения проблемы дробления стружки при механической обработке деталей из материалов, обладающих коррозионностойкими, жаропрочными свойствами; проведены лабораторные, стойкостные испытания комплексного метода.

Результаты изучения механизма стружкообразования при обработке резанием жаропрочных и коррозионностойких сплавов. Для решения проблемы в статье сформулированы две задачи, которые были решены с помощью информации, взятой из теории сопротивления материалов, диаграмм растяжения при испытании образцов из коррозионностойких, жаропрочных материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Разработана и представлена стружколомающая сменная режущая пластина с переменным передним углом. Представлены результаты и анализ данных лабораторных испытаний, в которых применялась пластина со стружколомающей геометрией передней поверхности, показаны режимные условия эффективного стружколомания. Сформулированы выводы по решению первой задачи, показано, что определяющим фактором при стружкодроблении являются физико-механические характеристики обрабатываемого материала, которые изменяются при различных режимах резания.

Заключение. В работе показано, что отвод стружки из зоны резания предотвращает попадание её в область режущей кромки, снижая ударные нагрузки на неё, повышая качество механической обработки.

© Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Чернышов М. О., 2020

Установлена возможность формирования в стружке концентраторов напряжения, приводящих к саморазрушению стружки даже при обработке вязких жаропрочных сплавов. Используется гипотеза о том, что температурные условия максимальной обрабатываемости жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов соответствуют условиям высокотемпературного охрупчивания, с помощью которого можно создать условия эффективного дробления стружки и условия максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов.

Ключевые слова: стружкообразование; скорость резания; обрабатываемость; высокотемпературное охрупчивание; концентратор напряжения; направление схода стружки; передняя поверхность.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Чернышов М. О. Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020; 24(1): 8-22. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-8-22>.

Поступила в редакцию 25.11.2019

Подписана в печать 21.12.2019

Опубликована 21.02.2020

Chip Breaking During Automated Processing by Cutting Hard-to-Work Steels by Integrated Use of Chip Breaking Tools and High-Temperature Embrittlement

Evgeny V. Artamonov¹, Dmitriy V. Vasil'yev¹ ✉, Mikhail O. Chernyshov¹

¹ Industrial University of Tyumen
38 Volodarskogo str., Tyumen 625000, Russian Federation

✉ e-mail: vasilevdy@tyuiu.ru

Abstract

Purpose of research is to increase productivity when cutting hard-to-work steels by integrated use of chip breaking tool geometry and cutting modes, which reduce the viscous properties of the chips and the processed material. The article discusses the problems of mechanical processing of parts of oil production equipment at enterprises in Western Siberia. It is presented the main condition for ensuring chip crushing and revealed the problem of low efficiency of existing methods in modern industry, to one degree or another guiding, curling and chip-cutting method.

Methods. Simulation modeling, calculation of chip direction and crushing were performed; effective methods for solving the problem of chip crushing during the machining of parts made of materials with corrosion-resistant, heat-resistant properties were identified; laboratory, persistent tests of the complex method were carried out.

Results of studying the mechanism of chip formation during processing by cutting heat-resistant and corrosion-resistant alloys are given here. To solve the problem, we have formulated two tasks that were solved using information taken from the theory of material resistance, tensile diagrams when testing samples of corrosion-resistant, heat-resistant materials with high operational properties. A chip breaking exchangeable insert with a variable rake angle is designed and presented. The results and analysis of laboratory test data, in which a plate with chip breaking geometry of the front surface is used, are presented, the operating conditions of effective chip breaking are shown. The conclusions on the solution of the first problem are formulated, it is shown that the determining factor in chip breaking is the physical and mechanical characteristics of the processed material, which vary with different cutting conditions.

Conclusion. The work shows that chip removal from the cutting zone prevents it from entering the cutting edge area, reducing impact loads on it and improving the quality of machining. It is possible to form stress concentrators in the

chips, leading to chip self-destruction even when processing viscous heat-resistant alloys. The hypothesis is used that the temperature conditions for the maximum workability of heat-resistant and corrosion-resistant steels and alloys correspond to the conditions of high-temperature embrittlement, with the help of which it is possible to create conditions for effective chip crushing and conditions for maximum workability when cutting heat-resistant steels and alloys.

Keywords: chip formation; cutting speed; workability; high-temperature embrittlement; stress concentrator; chip exit direction; front surface.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Artamonov E.V., Vasil'yev D. V., Chernyshov M.O. Chip Breaking During Automated Processing by Cutting Hard-to-Work Steels by Integrated Use of Chip Breaking Tools and High-Temperature Embrittlement. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 8-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-24-1-8-22>.

Received 25.11.2019

Accepted 21.12.2019

Published 21.02.2020

Введение

При производстве и ремонте нефтедобывающего оборудования на предприятиях Западной Сибири основной проблемой является механическая обработка резанием деталей из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами [1, 2], на станках с числовым программным управлением особой проблемой является образуемая стружка снижающая качество обрабатываемой поверхности при резании металлов, попадающая на главную и вспомогательную режущие кромки при резании в виде стальной ленты, нагретой до высоких температур и движущейся с большой скоростью, представленной на рис. 1.

Для обеспечения дробления стружки необходимо взаимодействие ее с различными препятствиями: различные поверхности инструмента, поверхности детали [3, 4, 5] и другие способы, представленные на рис. 2 [6, 7, 8, 9, 10, 11].



Рис. 1. Стружка сливная без завитков

Fig. 1. Chip without curls

Такие способы так или иначе направляют, завивают и становятся упорами для стружки, однако при обработке резанием фасонных поверхностей происходит изменение направления угла схода стружки поэтому присутствие на передней поверхности стружколомов малоэффективно. Также существуют такие жаропрочные стали и сплавы, при обработке которых образуемая стружка не поддается дроблению. Такие сплавы имеют высокие вязкие свойства и для

обеспечения стабильного и эффективного дробления стружки из этих материалов недостаточно применять специальные поверхности передней грани резцов, накладные стружколомы, стружколомные упоры и другие устройства для ломания стружки [12, 13].

Цель исследования заключается в повышении производительности при резании труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающей геометрии инструмента и режимов резания, обеспечивающих понижение вязких свойств стружки, обрабатываемого материала.

Для решения данной цели сформулированы следующие задачи:

- Создать такую переднюю поверхность токарного резца, геометрия которого обеспечивает устойчивое стружкодробление, точность обработки детали и уменьшение шероховатости обработанной поверхности.
- Разработать методику определения режимов резания, обеспечивающих снижение вязких свойств стружки, условия максимальной обрабатываемости, обрабатываемых деталей из легированных сталей и жаропрочных сплавов.

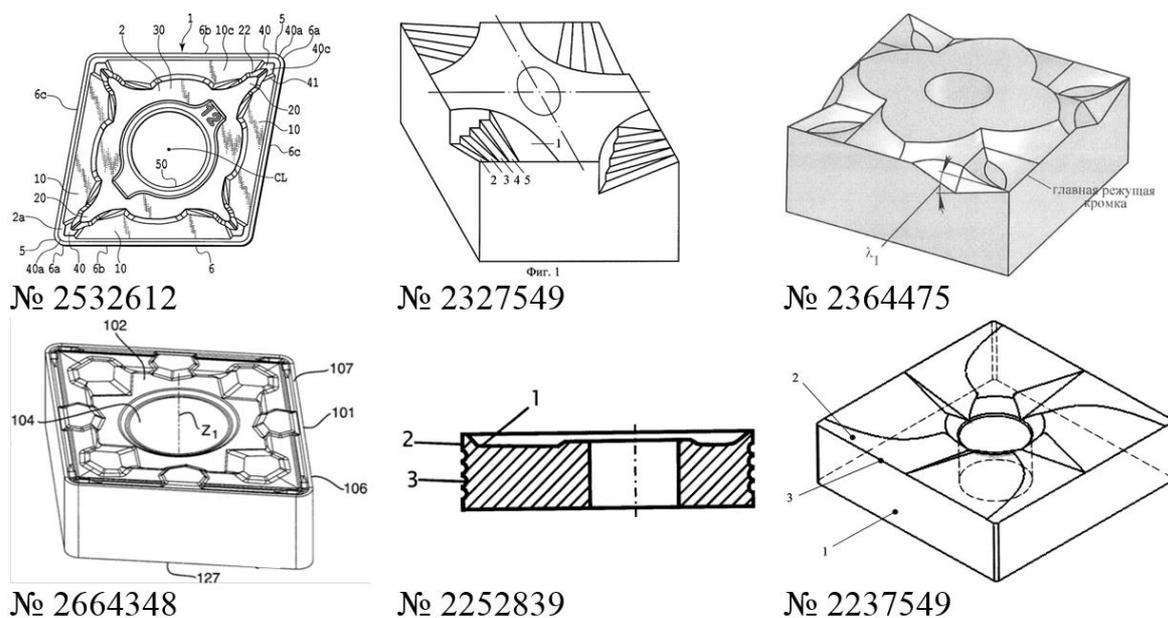


Рис. 2. Стружколомающие сменные режущие пластины

Fig. 2. Chipbreaking replaceable cutting plates

Материалы и методы

В поисках решений и методов для создания стружколомающей передней поверхности токарного резца авторами были исследованы способы снижения прочностных и пластических свойств

коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов.

В теории сопротивления материалов отмечено, что важной причиной снижения деформационной способности, на 90% и более, может быть присутствие в испытуемых образцах концен-

траторов неравномерности напряженного состояния, как показано на рис. 3. Диаграммы испытаний свидетельствуют о

том, что наиболее эффективно стружка должна дробиться в присутствии в ней концентраторов напряжения [14, 15].

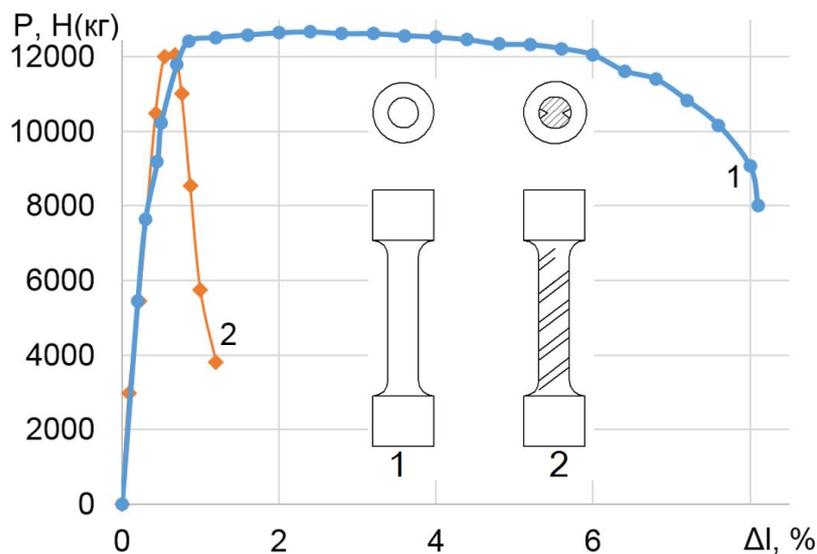


Рис. 3. Диаграмма растяжения, при испытании образцов из стали ХН35ВТ:
1 - гладкий образец; 2 - образец с концентраторами напряжения

Fig. 3. Tensile diagram, when testing samples of steel ХН35ВТ:
1 - smooth sample; 2 - sample with stress concentrators

Результаты и их обсуждение

В результате анализа информации стало известно, что концентраторы на поверхности стружки можно создать с помощью управления углом отклонения стружки (рис. 4), перепада коэффициента усадки стружки и деформации в поперечном сечении.

Спроектированная авторами стружколомающая пластина, представленная на рис. 5, состоит из стружкозавивающей канавки, которая формируется плоской поверхностью 1 с неизменным положительным главным передним углом γ_1 и вспомогательным передним углом γ_2 , конусовидной поверхности 2, переходящую в вертикальную плос-

кость 8 и переднюю поверхность 3, изготовленную под отрицательным главным передним углом γ_3 и положительным вспомогательным передним углом γ_3' , образующую с плоской поверхностью стружкозавивающей канавки 1 единую главную режущую кромку 5, на которой под углом γ_f изготовлена фаска 6. Пластина имеет боковые грани 4 и 10, выполненные с задним углом пластины. Вертикальная плоскость 8 со стружкоделительной кромкой 7 находится относительно главной режущей кромки 5 под углом ν , на расстоянии рабочего участка – С от вершины режущей части пластины с радиусом при вершине r.

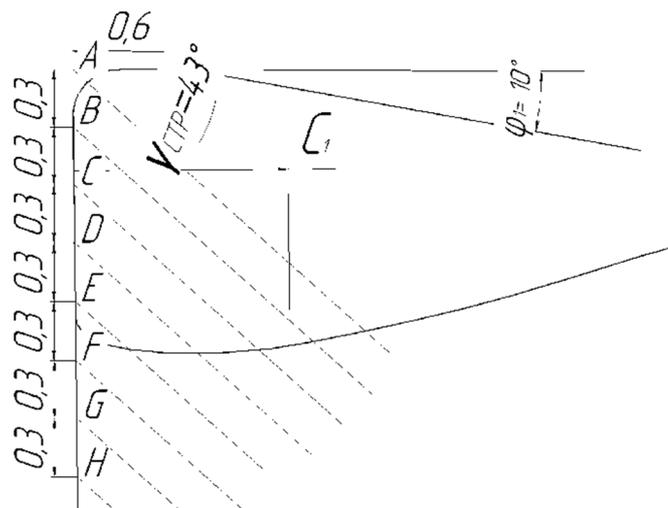


Рис. 4. Схема определения направления схода стружки на передней поверхности пластины (вид в плане)

Fig. 4. Scheme for determining the direction of chip flow on the front surface of the plate (plan view)

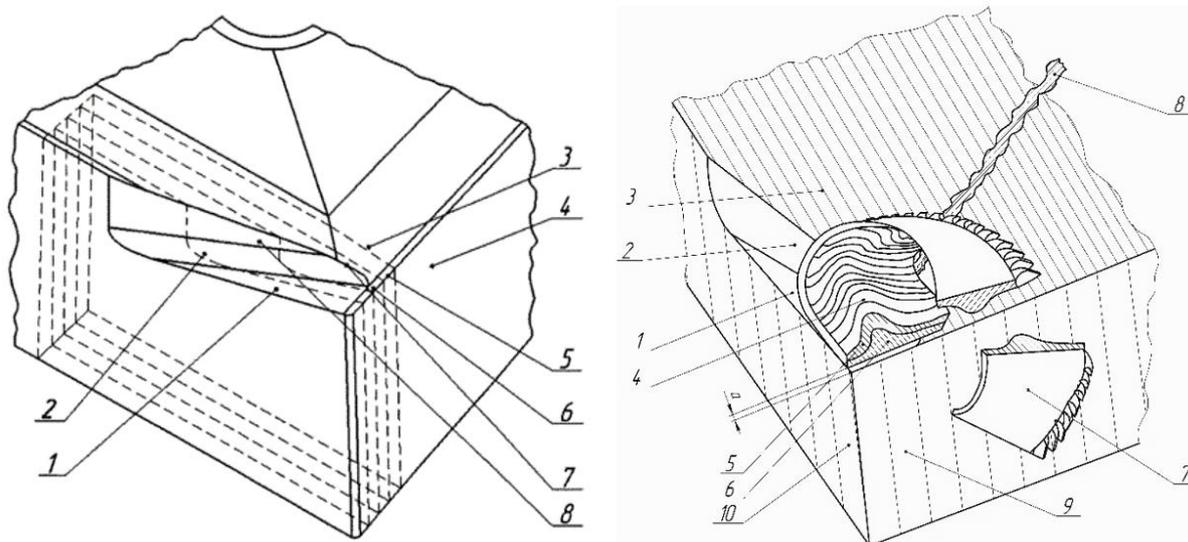


Рис. 5. Стружколомающая сменная режущая пластина с переменным передним углом

Fig. 5. Chip breaking replaceable insert with variable rake angle

Такая геометрия передней поверхности токарного резца не имеет выступов, которые создают опасные напряжения на режущей кромке. А плавные переходы стружколомающих поверхностей позволяют выдерживать нагрузки, образуемые при черновой обработке точением.

При условии, когда $2/3$ ширины поперечного сечения стружки образуются при положительной геометрии, а оставшаяся $1/3$ – при отрицательной геометрии, стружка будет иметь разный коэффициент усадки поперечного сечения, **определение (1)**, что неизбежно приведет к образованию концентрато-

ров напряжения на 1/3 части стружки, как показано на рис. 4 [16].

$$K = \sqrt{1 + \frac{L_n}{S} - \cos \gamma}, \quad (1)$$

где S – продольная подача, мм/об.;

L_n – длина контакта стружки с плоской поверхностью l в сечении n .

Лабораторные испытания с использованием данной пластины показали, что эффективное стружколомание обеспечивается при высоких скоростях резания и больших подачах, и малоэффективное стружколомание при средних скоростях резания и малых подачах (табл. 1).

Таблица 1. Виды стружки, полученные при точении стали 30ХГСА, резцом из твердого сплава ВК8 со стружколомающей геометрией

Table 1. The types of chips obtained by turning steel 30HGSA with a VK8 hard alloy cutter with chip breaking geometry

Сливная стружка	Суставчатая стружка	Элементная стружка
		
59 м/мин; $S=0,23$ мм/об	94 м/мин; $S=0,34$ мм/об	94 м/мин; $S=0,43$ мм/об

Анализ табл. 1 показал, что определяющим фактором при стружкодроблении является не геометрия, а физико-механические характеристики обрабатываемого материала, которые изменяются при различных режимах резания [17].

В поисках решения второй задачи был проведён анализ справочных данных зависимостей механических характеристик от температуры жаропрочных сталей, изображенных на рис. 6.

Анализ показал, что эти стали и сплавы подвержены высокотемпературному охрупчиванию [17], приводя-

щему к минимальным значениям составляющей силы резания P_z , затрачиваемой мощности на процесс резания, минимальным износом режущего инструмента. Такие значения ведут к повышению обрабатываемости материалов, изменению вида стружки из сливной в элементную, уменьшению коэффициента сплошности стружки k_s .

Таким физическим явлением как высокотемпературное охрупчивание можно пользоваться при создании условий дробления стружки.

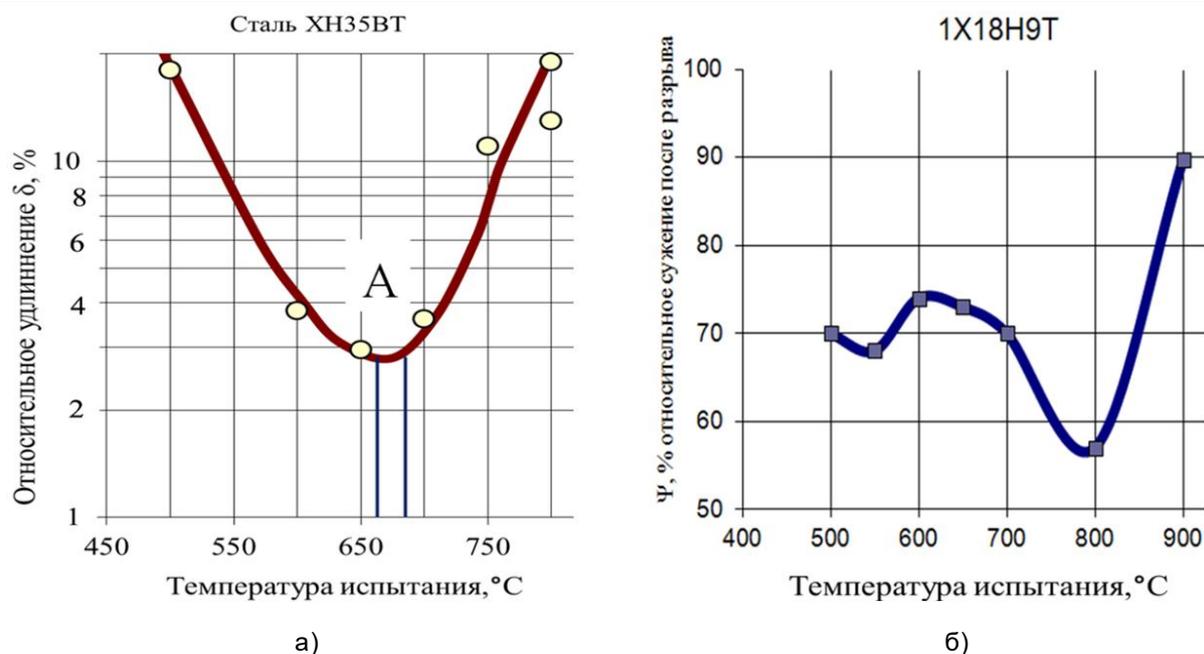


Рис. 6. Зависимость механических характеристик сталей от температуры

Fig. 6. The dependence of the mechanical characteristics of steels on temperature

По рис. 6,а видно, что максимальный эффект охрупчивания для сплава ХН35ВТ имеет место при определённой температуре, равной 650 - 700 °С. Этот температурный диапазон и необходимо создавать в процессе резания.

Для доказательства данного предположения в лаборатории резания металлов ТИУ, ИПТИ, кафедры «СИ» были проведены стойкостные испытания при черновой обработке стали 05Х16Н4Д2Б, результаты которых показали явную зависимость вида стружки от температурно-скоростного фактора (табл. 2).

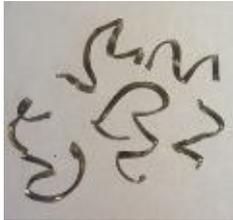
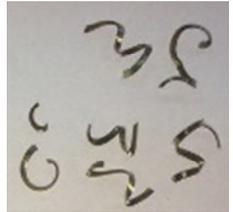
Кратковременные стандартные испытания при резании показали влияние температурно-скоростного фактора на вид стружки, то есть с повышением скорости и температуры резания происходит переход от одного вида стружки к другому: при невысоких температурах

резания (до 500° - 600°С) элементная стружка с такими характеристиками, как шаг элементов – m , толщина элемента – b_1 , высота сплошного участка стружки – a_2 , толщина или высота элемента стружки – a_1 , угол наклона плоскости сдвига (скола) элемента – ϕ_K , переходит в сливную, характеризующуюся углом наклона условной плоскости сдвига – ϕ_K и коэффициентом усадки стружки ξ , с дальнейшим повышением температуры ($\approx 750^\circ - 800^\circ$ С) происходит обратный переход сливной в элементную стружку [17], как показано в табл. 2.

Результаты эксперимента подтвердили диаграмму, предложенную профессором Полетикой М.Ф. [18], и показали хорошую взаимосвязь с результатами экспериментов работ [19, 14, 20].

Таблица 2. Вид стружек при обработке стали 05X16H4Д2Б, резцом из твердого сплава VK8 $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $S=0,43$ мм/об

Table 2. Type of chips during processing of steel 05X16H4D2B, VK8 solid carbide cutter $\gamma=10^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $S = 0,43$ mm / rev

	
$v = 11$ м/мин, $\theta < 550^\circ$, Сливная	$v = 22$ м/мин, $\theta = 550^\circ$, Сливная
	
$v = 43,5$ м/мин, $\theta = 780^\circ$, Суставчатая	$v = 55$ м/мин, $\theta = 850^\circ$, Суставчатая
	
$v = 63$ м/мин, $\theta = 900^\circ$, Элементная	$v = 90$ м/мин, $\theta = 955^\circ$, Элементная

Однако предлагаемое физическое явление высокотемпературного охрупчивания, определяемое по зависимости вида стружки от температурно-скоростного фактора, визуально можно зафиксировать не на всех обрабатываемых сталях и сплавах. В этих случаях автором предлагается применять метод определения снижения вязких свойств стружки по коэффициенту сплошности стружки k_s .

Пользуясь разработанным методом определения коэффициента сплошности стружки k_s (2), можно определить отно-

шение максимальной площади поперечного сечения стружки к площади сплошного слоя стружки в этом сечении:

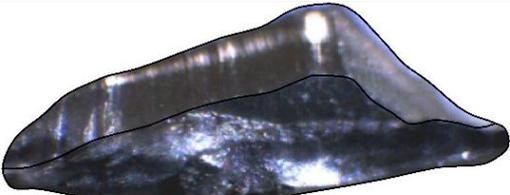
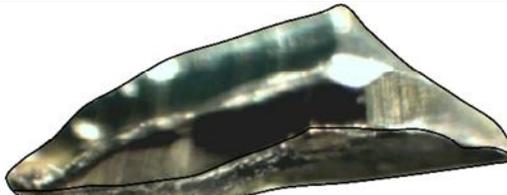
$$k_s = \frac{S_2}{S_1}, \quad (2)$$

где S_1 – максимальная площадь поперечного сечения стружки;

S_2 – площадь сплошного слоя стружки, как правило, сплошной слой стружки обуславливается четкой зернистостью (фасетками) в отличие от остальной сглаженной поверхности, как представлено в табл. 3 [15].

Таблица 3. Фрактограммы разрушения стружки в зависимости от скорости резания стали 05X16H4D2B

Table 3. Chip fracture patterns depending on the cutting speed of 05X16H4D2B steel

	
$v = 11 \text{ м/мин}$, Сливная, $k=0,91$	$v = 22 \text{ м/мин}$, Сливная, $k=0,72$
	
$v = 43,5 \text{ м/мин}$, Суставчатая, $k= 0,54$	$v = 55 \text{ м/мин}$, Суставчатая, $k=0,65$
	
$v = 63 \text{ м/мин}$, Элементная, $k=0,5$	$v = 90 \text{ м/мин}$, Элементная, $k=0,26$

Используя результаты научной работы, сформулированной и доказанной гипотезы [15], а также защищенную патентом методику «Формирования условий максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов твердосплавным инструментом» [20], можно определить режимы резания, при которых параметры $P_z, \xi, h_{онз}$ принимают минимальные значения, как показано на рис. 7.

Эти закономерности указывают на температурно-скоростной диапазон, в котором обрабатываемый материал имеет минимальные эксплуатационные характеристики, а значит в этом температурном диапазоне разрушать, дробить стружку будет значительно легче.

Выводы

1. Эффективный стружкоотвод из зоны резания по стружкозавивающей канавке в сторону главной задней поверхности, не участвующей в процессе резания, исключает вероятность попадания её в область режущей кромки, снижая ударные нагрузки на неё, повышая качество токарной обработки.

2. Разделение ширины срезаемого слоя формирует на левом краю стружки концентраторы напряжения, которые приводят к саморазрушению стружки о главную заднюю поверхность инструмента даже при обработке вязких жаропрочных сплавов.

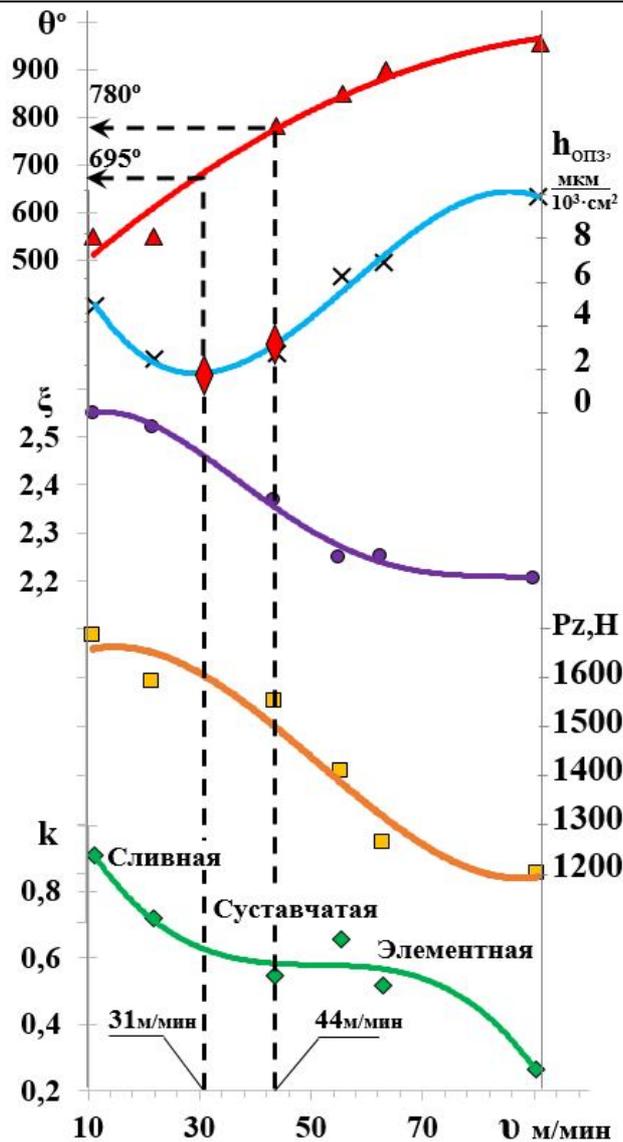


Рис. 7. Зависимости температуры резания θ °С, относительного износа по задней поверхности $h_{\text{опз}}$ (мм), коэффициента усадки стружки ξ , силы резания P_z , коэффициента сплошности стружки k_s от скорости резания V (м/мин) при обработке стали 05X16H4D2B

Fig. 7. Dependences of the cutting temperature θ °С, relative wear on the rear surface $h_{\text{опз}}$ (mm), shrinkage coefficient ξ , cutting force P_z , chip continuity coefficient k_s on cutting speed V (m / min) when machining steel 05X16H4D2B

3. Применяя такое физическое явление, как высокотемпературное охрупчивание, решается задача дробления стружки жаропрочных материалов, при обработке резанием.

4. Комбинируя данную геометрию передней поверхности стружколомающей пластины с физическим явлением высокотемпературного охрупчивания получа-

ем возможность снизить высокую температуру резания, негативно действующую на работоспособность твердосплавного режущего инструмента.

5. Используя физическое явление высокотемпературного охрупчивания можно создать условия максимальной обрабатываемости при резании жаропрочных сталей и сплавов.

Список литературы

1. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
2. Силин С.С. Метод подобию при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
3. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2011. 368 с.
4. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высш. школа, 1974. 587 с.
5. Влияние скорости резания на стружкообразование при точении жаропрочных сплавов на основе хрома и никеля / А.М. Адашкин, В.Н. Бутрим, А.А. Верещака, А.С. Верещака, В.В. Каширцев // СТИН. 2014. № 10. С. 23-27.
6. Пат. РФ № 2664348 Российская Федерация, МПК В23В 27/22. Пластина для токарной обработки резанием и токарный инструмент / Селин Эрик, Хегбовеген Леф, Ронни Элгстиген; заявитель и патентообладатель Сандвик Интеллекчуал Проперти АБ (SE). № 2014126091; заявл. 26.06.2014; опубл. 16.08.2018, Бюл.№23.
7. Пат. РФ № 2237549 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Сменная режущая пластина / Михайлов С.В., Скворцов Д.С.; заявитель и патентообладатель «Костромской государственной технологической университет» (RU). № 2003105381/02; заявл. 25.02.2003; опубл. 10.10.2004, Бюл.№28.
8. Пат. РФ № 2252839 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Режущая пластина / Васин С.А., Васин Л.А., Иванов В.В., Лавит И.М., Хлудов С.Я., Денисов Е.П., Денисов И.Е. ; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет (ТулГУ) (RU). № 2003130758/02; заявл. 20.10.2003; опубл. 27.05.2005, Бюл.№ 15.
9. Пат. РФ № 2532612 Российская Федерация, МПК В23В 27/22. Режущая пластина / Мадзима Синия; заявитель и патентообладатель Тунгалоу Корпорейшн (JP). № 2012147794/02; заявл. 06.05.2011; опубл. 10.11.2014, Бюл.№ 31.
10. Пат. РФ № 2364475 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Сменная режущая пластина / Михайлов С. В., Олейник А. П.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Костромской государственной технологической университет" (RU). № 2008112516/02, заявл. 31.03.2008; опубл. 20.08.2009, Бюл.№ 23.
11. Пат. РФ № 2327549 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Режущая многогранная сменная пластина / Матвеев В. С., Баннов К. В., Градобоев А. В., Копнова Р. Д., Нестеренко В. П.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» (RU). № 2006134134/02; заявл. 25.09.2006; опубл. 27.06.2008, Бюл.№ 18.

12. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
13. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 448 с.
14. Работоспособность инструментов и физико-механические характеристики инструментальных твердых сплавов и обрабатываемых материалов / Е.В. Артамонов, Д.С. Василега, М.С. Остапенко, В.А. Шрайнер; под общей ред. М.Х. Утешева. Тюмень: Изд. «Вектор Бук», 2008. 160 с.
15. Artamonov E.V., Vasil'ev D.V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, is. 6, p. 404-405.
16. Пат. РФ №2665858 Российская Федерация, МПК В23В 27/22. Стружколомающая сменная режущая пластина с переменным передним углом / Труфанов Г. Г., Артамонов Е.В., Васильев Д.В.; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет (RU). № 2017133388; заявл. 25.09.2017; опубл. 04.09.2018, Бюл.№25.
17. Пат. РФ №2658559 Российская Федерация, МПК В23В1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Чернышов М. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет" (ТИУ) (RU). №2017119585; заявл. 05.06.2017; опубл. 21.06.2018, Бюл.№ 18.
18. Полетика М.Ф. Теория резания. Ч. 1. Механика процесса резания. Томск: Изд-во ТПУ, 2001.
19. Мокрицкий Б.Я. , Алтухова В.В., Саблин П.А. Повышение эффективности стружкообразования при колёсотокарной обработке // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 2. С. 33-38.
20. Розенберг Ю.А. Методы аналитического определения степени деформации металла стружки при резании // Вестник машиностроителя. 2001. №3. С. 34-38.

References

1. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 278 p. (In Russ.).
2. Silin S. S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [Method of similarity when cutting metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 152 p. (In Russ.).
3. Grigoriev S. N. *Metody povysheniya stoikosti rezhushchego instrumenta* [Methods of increasing the resistance of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011, 368 p. (In Russ.).

4. Poduraev V. N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting of hard-to-work materials]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1974, 587 p. (In Russ.).

5. Adaskin A.M., Butrim V. N., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A. S., Kashirtsev V. V. Vliyaniye skorosti rezaniya na struzhkobrazovanie pri tochenii zharoprochnykh splavov na osnove khroma i nikelya [Influence of cutting speed on chip formation when turning high-temperature alloys based on chromium and Nickel]. *STIN = STIN*, 2014, no. 10, pp. 23-27 (In Russ.).

6. Celine Eric, Halbower Löf, Ronnie Altigen. *Plastina dlya tokarnoi obrabotki rezaniem i tokarnyi instrument* [Plate for lathe machining and lathe tool]. Patent RF, no. 2664348, 2018.

7. Mikhailov S. V., Skvortsov D. S. *Smennaya rezhushchaya plastina* [Replaceable cutting plate]. Patent RF, no. 2237549, 2004.

8. Vasin S. A., Vasin L. A., Ivanov V. V., Lavit I. M., Khludov S. Ya., Denisov E. P., Denisov I. E. *Rezhushchaya plastina* [Cutting plate]. Patent RF, no. 2252839, 2005.

9. Madzima Sinia. *Rezhushchaya plastina* [Cutting plate]. Patent RF, no. 2532612, 2014.

10. Mikhailov S. V., Oleinik A. P. *Smennaya rezhushchaya plastina* [Replacement plate]. Patent RF, no. 2364475, 2008.

11. Matveev V. S., Bannov K. V., Gradoboev A.V., Kopnova R. D., Nesterenko V. P. *Rezhushchaya mnogogrannaya smennaya plastina* [Cutting polyhedral replaceable plate]. Patent RF, no. 2327549, 2008.

12. Bobrov V. F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 344 p. (In Russ.).

13. Vasin S. A., Vereshchaka A. S., Kushner B. C. *Rezanie materialov: Termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosvyazei pri rezanii* [Cutting materials: Thermomechanical approach to the system of relationships in cutting]. Moscow, MSTU publishing House. N. E. Bauman Publ., 2001, 448 p. (In Russ.).

14. Artamonov E. V., Vasilega D. S., Ostapenko M. S., Schreiner V. A. *Rabotosposobnost' instrumentov i fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki instrumental'nykh tverdykh splavov i obrabatyvaemykh materialov* [Performance of tools and physical and mechanical characteristics of structural hard alloys and processed materials]. Tyumen, Vektor Buk Publ., 2008, 160 p. (In Russ.).

15. Artamonov E. V., Vasil'ev D. V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, is. 6, pp. 404-405.

16. Trufanov G. G., Artamonov E. V., Vasiliev D. V. *Struzhkolo-mayushchaya smennaya rezhushchaya plastina s peremennym perednim uglom* [Chip-breaking replaceable cutting plate with variable front angle]. Patent RF, no. 2665858, 2018.

17. Artamonov E. V., Vasiliev D. V., Chernyshov M. O. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya* [Method of determining the optimal cutting speed]. Patent RF, no. 2658559, 2018.

18. Poletika M. F. *Teoriya rezaniya. Mekhanika protsessa rezaniya* [Theory of cutting, Mechanics of the cutting process]. Tomsk, 2001 (In Russ.).

19. Mokritskiy B. Ya., Altukhova V. V., Sablin P. A. Povyshenie effektivnosti struzhkoobrazovaniya pri kolesotokarnoi obrabotke [Improving the efficiency of chip formation in wheel-rolling processing]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of Mechanical Engineering and Automation*, 2013, no. 2, pp. 33-38 (In Russ.).

20. Rosenberg J. A. Metody analiticheskogo opredeleniya stepeni deformatsii me-talla struzhki pri rezanii [Analytical Methods for determining the degree of deformation of the metal chips when cutting]. *Vestnik mashinostroitelya = Vestnik of Mechanical Engineering*, 2001, no.3, pp. 34-38 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Артамонов Евгений Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Evgeny V. Artamonov, Dr. of Sci.
(Engineering), Professor, Head of the Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Васильев Дмитрий Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: vasilevdv@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Dmitriy V. Vasil'yev, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: vasilevdv@tyuiu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Чернышов Михаил Олегович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: chernyshovmo@tyuiu.ru

Mikhail O. Chernyshov, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: chernyshovmo@tyuiu.ru