

**Резание с опережающим пластическим деформированием
в технологиях утилизации металлической стружки**

07, июль 2013

DOI: 10.7463/0713.0567548

Ярославцев В. М.

УДК 621.941.1: 658.588.8

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

mt13@bmstu.ru

Одной из главных задач любого вида промышленного производства является снижение материальных затрат на изготовление выпускаемой продукции. В современном производстве среди всех технологических методов изготовления наибольшее место занимает обработка резанием. И это несмотря на общепризнанный недостаток метода резания – значительный процент отхода металла в стружку (стружка – деформированный и отделенный в результате обработки резанием поверхностный слой материала заготовки – ГОСТ 25762-83). В зависимости от вида и типа производства в стружку может уходить до 70 % и более материала обрабатываемой заготовки. Убытки, связанные с потерей металла в виде стружки и ее последующей переработкой, оценивают в мировой экономике десятками млрд. долларов в год. Поэтому задачи выявления и разработки эффективных технологий утилизации стружки относят к одной из общих проблем мировой экономики и экологии.

На данный момент основной способ переработки стружки – это переплав в металлургических печах. Ежегодно на переплавку поступают миллионы тонн высококачественного металла в виде стружки. Такая утилизация металлических отходов машиностроительных производств сопряжена с высокой трудоемкостью и большими непроизводительными затратами. Так, из-за несовершенства технологии подготовки стружки для переплава большой процент (до 30 и даже 50%) металла "выгорает".

Особенно большие трудозатраты связаны с переработкой так называемой сливной стружки. Лентообразная сливная, путаная стружка занимает объем, до 300–400 раз [1] превышающий объем снятого при обработке на металлорежущих станках материала (объемная плотность до 0,0025–0,003). Европейским Союзом определены стандарты на лом, система классификации которого основана на учете его качества. В зависимости от категории объемная плотность дробленого лома (отношение объема металлической массы к объему, который она занимает) должна составлять не менее 0,8 или 0,9 [2]. Заданная плотность товарной стружки достигается брикетированием ее на прессовом оборудовании. Для этого размеры отдельных элементов стружки не должны превышать определенной величины (обычно до 100 мм). Поэтому до переплавки на

металлургических предприятиях образующаяся при обработке на металлорежущих станках стружка транспортируется в специальные подразделения, где производится ее измельчение и брикетирование. Для этих целей используется энергоемкое дорогостоящее технологическое оборудование: различные мельницы, стружкодробилки ножевые, грохоты и др., а также гидравлические прессы для холодного или горячего брикетирования.

В то же время, стружка как объект обработки режущими инструментами (ножи, фрезы и т.п.) при измельчении на стружкодробилках разного типа и инструментами для брикетирования на прессах (головки пресс-штемпеля, матрицы и др.) вызывает большие трудности, связанные с ее высокими физико-механическими свойствами, в частности, твердостью. На рис. 1 в качестве примера показано распределение микротвердости в основном материале заготовки и материале стружки в зоне стружкообразования. В таблице приводятся обобщенные данные измерений твердости материала в стружке при резании, полученные разными авторами. Как видно из таблицы, твердость стружки до 2–3 раз выше, чем исходная твердость обрабатываемого материала заготовки (коэффициент K_H). При этом твердость контактной зоны стружки может быть существенно (в 1,2 ... 2 раза) выше ее средних значений, приведенных в таблице. Например, по данным [3] для различных марок обрабатываемых сталей соотношение твердостей материала самой стружки и ее прирезцово́й зоны имеет следующие значения: сталь 25 – 1,56 ... 1,6; сталь 45 – 2,05 ... 2,13; сталь У12А – 1,21 ... 1,37; 12Х18Н9Т – 1,16 ... 1,19; ЭИ654 – 1,11 ... 1,19. В результате твердость материала поверхностного слоя контактной стороны стружки может в 2,5 ... 4 раза превышать исходную твердость обрабатываемого материала заготовки.

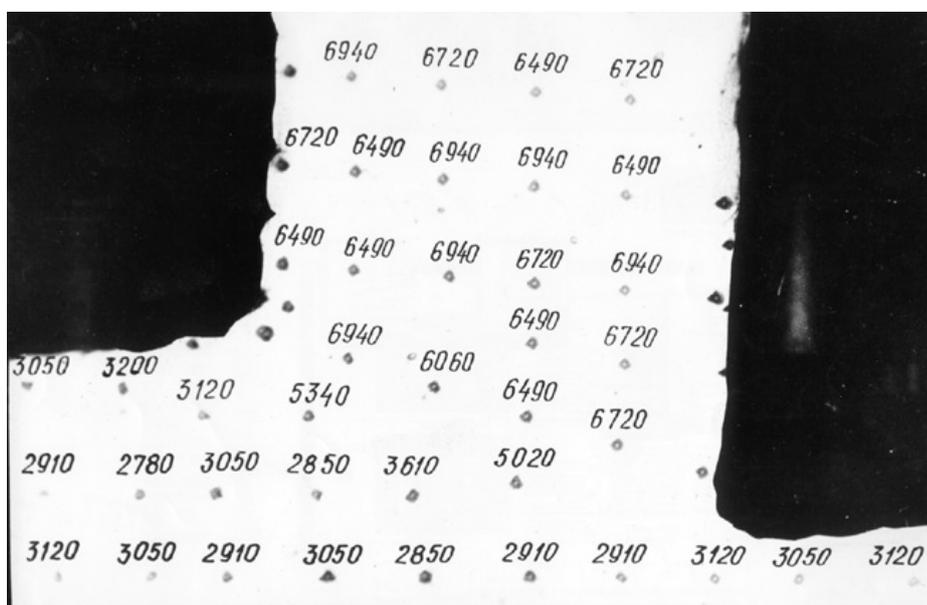


Рис. 1. Распределение микротвердости в корне стружки сплава ХН77ТЮР
($v = 0,29$ м/с; $a = 0,2$ мм; $b = 3$ мм)

Опытные данные относительного изменения твердости материала стружки при резании

Источ-ник	Обрабатываемый материал	Метод измерения твердости	Твердость материала заготовки, МПа	Твердость материала стружки, МПа	Относительное увеличение твердости K_H
[1]	12X18H10T	H_{100}	2070	3090–3670	1,49 –1,77
[4]	-	H_{100}	930	1900–2110	2,04–2,27
	-		1030	2110–2250	2,05–2,18 (2,36)
	-		1030	2080–2200	2,02–2,14
[5]	Медь	H_{200}	570	1300–1360	2,3–2,4
[6]	Сталь 08	HV	-	-	2,84
	Медь М2	H_{200}	-	-	1,4
[7]	Сталь 20	H_{50}	1900	2760–3930	1,45–2,07
	Сталь А12	H_{50}	2010	2620–3960	1,3–1,97
	-	H_{50}	1440	3080	2,14
[8]	-	$H_{\mu p}$	900	1500–2720	1,67 –3,02
[*]	12X18H10T	H_{50}	1700	3200–3440	1,88 –2,02
	XH77TЮР	H_{50}	3050	6490–6940	2,12 –2,28
	20X13	H_{100}	2120	3620–3740	1,71 –1,76
	37X12H8Г8МФБ	H_{100}	2860	4450–4800	1,56 –1,68
	ЖС6-КП	H_{100}	2980	4980–5240	1,67 –1,76
[9]	40XHMA	H_{50}	2020	5000–6200	2,48 –3,07

Примечание. [*] – данные, полученные автором

Кроме того, во многих случаях при обработке резанием на передней поверхности инструмента образуется нарост (рис. 2), частицы которого при периодическом его разрушении (с частотой примерно 50–75 Гц) остаются в стружке. Твердость нароста при обработке сталей составляет $HRC = 60–65$ [8], что соответствует значениям твердости быстрорежущих инструментальных сталей или сверхпрочных закаленных и дисперсионно твердеющих сталей, для которых указанные свойства достигаются специальным химическим составом материала и термообработкой. В результате, материал стружки и частицы нароста еще более высокой твердости оказывают интенсивное абразивное воздействие на рабочий инструмент для дробления и брикетирования, значительно сокращая срок их службы. Указанные свойства стружки приводят к значительным затратам труда и материальных средств при ее измельчении для последующего брикетирования перед переплавкой. Процесс измельчения отличается высокой энергоемкостью, низкой стойкостью рабочего инструмента, частым выходом из строя технологического оборудования.

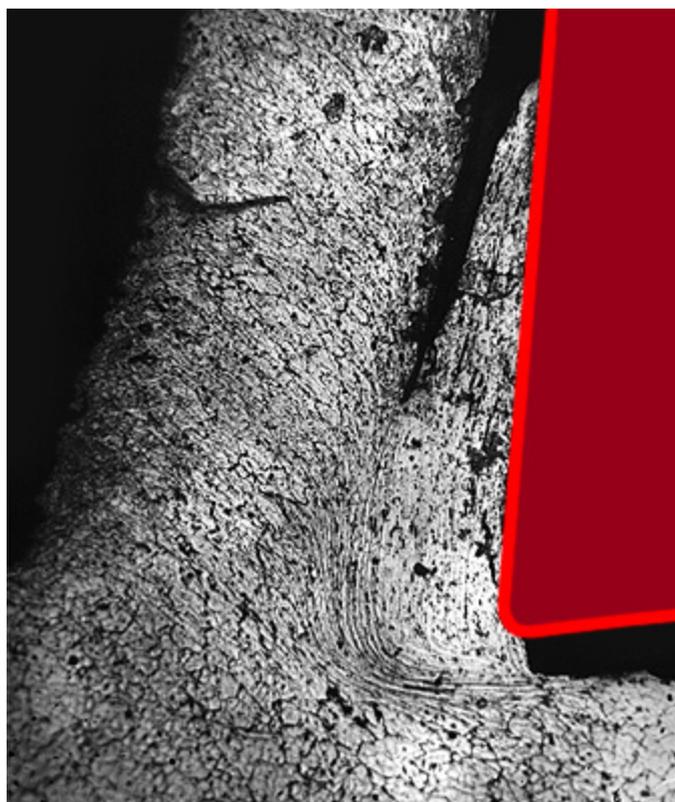


Рис. 2. Микрофотография корня стружки с наростом. Сталь 20X13

Повышение экономических показателей и качества переработки стружки может быть достигнуто за счет ее дробления непосредственно на металлорежущих станках при изготовлении деталей. Это позволяет полностью исключить этап измельчения стружки на специальном оборудовании, увеличить при этом производительность утилизации, значительно сократить потери при транспортировке, уменьшить травматизм и освободить цеховое пространство.

Однако применение существующих методов дробления стружки в процессе резания почти во всех случаях сопряжено со снижением технологических показателей обработки. Например, методы кинематического стружкодробления (вибрационное резание, дискретное точение на станках с ЧПУ и др.) вызывают, как правило, снижение производительности и качества обработки, сокращают ресурс работы технологического оборудования. Другие методы (заточка на передней поверхности инструмента лунки или уступа, применение стружколомов, введение в состав обрабатываемого материала специальных присадок, предварительное перерезание части припуска заготовки и др.) приводят к уменьшению периода стойкости режущего инструмента или снижению качества применяемого конструкционного материала, производительности труда, повышению себестоимости изготовления деталей. По этим причинам во многих случаях дробление стружки в процессе обработки заготовок на металлорежущих станках не применяется.

В качестве эффективного средства дробления стружки при обработке изделий на токарных станках можно рекомендовать метод резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [10, 11].

Метод предназначен для улучшения обрабатываемости широкой номенклатуры конструкционных материалов, в первую очередь, труднообрабатываемых сталей и сплавов с повышенной вязкостью, процесс резания которых сопровождается

образованием сливной стружки. Существенным достоинством метода ОПД является возможность совмещения процессов дробления стружки и одновременного улучшения выходных показателей обработки – повышения производительности труда (в 1,1 ... 1,6 раза), увеличения периода стойкости режущего инструмента (в 2 ... 6 раз), улучшения качества обработанных поверхностей, повышения эксплуатационных характеристик изделий. Такой технологический результат в комплексе не обеспечивают другие, известные в настоящее время способы обработки.

Эффективность метода ОПД достигается путем целенаправленного изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя путем его предварительного деформирования, осуществляемого в процессе резания дополнительным механическим источником энергии. В качестве такого источника энергии используют различные методы поверхностного пластического деформирования: обкатывание роликом, выглаживание, ультразвуковое упрочнение, центробежную обработку, чеканку. Принципиальная схема точения с ОПД путем накатывания поверхности резания роликом показана на рис. 3.

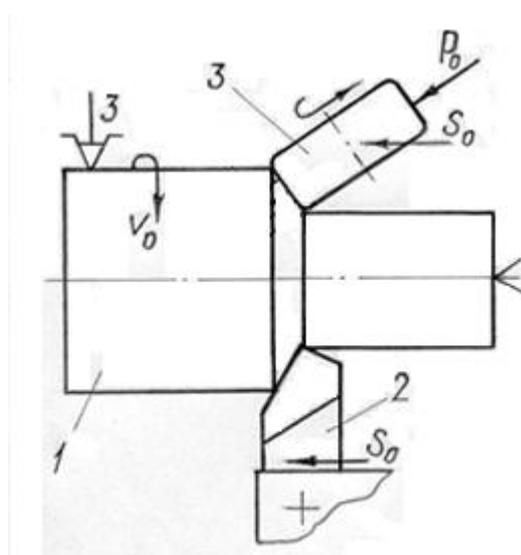


Рис. 3. Схема наружного точения с ОПД

1 – заготовка; 2 – режущий инструмент; 3 – упрочняющее устройство ОПД (накатной ролик);

(v_0 – скорость резания; S_0 – подача инструмента устройства ОПД; P_0 – сила действия упрочнителя)

Предварительная деформация материала срезаемого слоя дополнительным устройством ОПД вызывает снижение его пластичности и, наряду с улучшением указанных выше технологических показателей обработки, может вызывать дробление сливной стружки. Для обеспечения надежного дробления стружки при обработке разных конструкционных материалов (углеродистых и легированных сталей, цветных сплавов, труднообрабатываемых сталей и сплавов и др.) в широких интервалах изменения условий резания с ОПД применяют специальную конструкцию деформирующего инструмента – накатной ролик с одним или более выступающими зубьями (рис. 4). В процессе обработки зубья наносят на поверхности резания углубления в виде насечек. Насечки в срезаемом слое являются концентраторами напряжений и при образовании стружки способствуют ее разделению на элементы заданной длины.

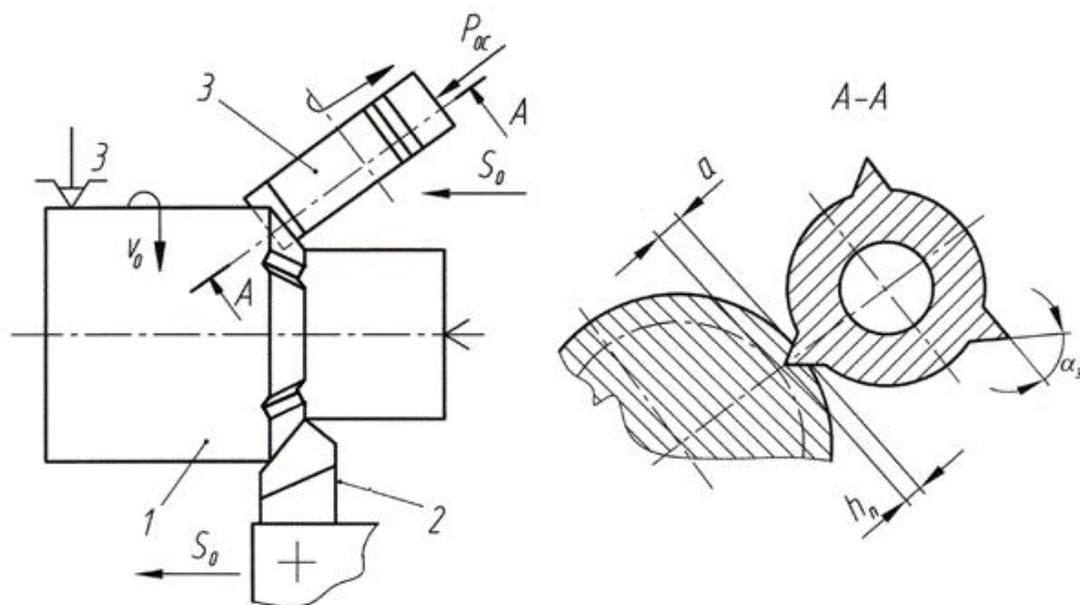


Рис. 4. Схема точения с ОПД и одновременным стружкодроблением:

1 – заготовка; 2 – резец; 3 – накатной зубчатый ролик

(P_{oc} – сила воздействия зубчатого ролика на срезаемый слой в момент насаживания лунок)

При точении с ОПД накатной ролик обычно изготавливают цельным из стали ШХ15, термообработанной до HRC 58–60. Для дробления сливной стружки в процессе обработки с ОПД применяют сборный ролик со сменными зубчатыми вставками (рис. 5), которыми осуществляют насаживание лунок на поверхности резания. Необходимое число зубчатых вставок определяют из соотношения

$$z = \pi D / (K_l L),$$

где D – внешний диаметр ролика, мм; K_l – коэффициент укорочения стружки; L – требуемая для эффективной утилизации длина элементов дробленой стружки, мм. Вычисленное по этой формуле значение z округляют до целого числа.



Рис. 5. Общий вид накатного ролика с вставными зубчатыми элементами

Внешний диаметр ролика определяют из конструктивных соображений с учетом размещения подшипников, рассчитанных на заданные условия обработки, долговечность и другие характеристики.

При отсутствии специальных требований к длине отдельных элементов стружки L ролик выполняют с двумя (тремя) зубчатыми вставками.

Ширину B рабочей поверхности ролика и зубчатой вставки задают равной двум длинам его контакта с заготовкой:

$$B \geq 2t/\sin\varphi,$$

где t – глубина резания; φ – главный угол резца в плане.

Это позволяет дважды использовать изношенные зубчатые вставки без их переточки путем перестановки в посадочных гнездах ролика.

Экономическая эффективность такого метода дробления стружки во многом определяется продолжительностью работы зубчатых вставок до переточки, т. е. их способностью противостоять механическому разрушению и износу под действием нагрузок в процессе формирования лунок.

Работоспособность зубчатого ролика при точении с ОПД и стружкодроблением определяется углом α_3 заточки зуба при вершине, глубиной $h_{\text{д}}$ его внедрения в материал заготовки (см. рис. 4) и материалом зубчатых вставок.

Угол заточки зубчатого элемента следует задавать по возможности наибольшим [12]. При этом необходимо учитывать, что с увеличением угла α_3 происходит увеличение силы, необходимой для внедрения зубчатого элемента в материал заготовки. В соответствии с этим выбор допустимого усилия внедрения зуба ролика производится с учетом величины оптимального усилия P_0 ОПД, обеспечивающего наиболее высокие технологические и технико-экономические показатели процесса резания [13].

Глубина внедрения зубьев в срезаемый слой заготовки принимается по возможности наименьшей. Минимальная глубина насечек $h_{\text{д}}$ в срезаемом слое толщиной a (см. рис. 4) зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и условий обработки и определяется условиями устойчивого дробления сливной стружки на весь период стойкости насекающих элементов с учетом их износа по высоте до принятого критерия затупления.

Наибольшее влияние на продолжительность работы зубчатых вставок до затупления оказывают материал зубчатого элемента и физико-механические свойства материала заготовки.

На рис. 6 представлены результаты стойкостных испытаний зубчатых вставок ролика из разных материалов: шарикоподшипниковой стали ШХ15 (HRC 58–60), углеродистой инструментальной стали ХВГ (HRC 63–65), инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 и вольфрамовых твердых сплавов ВК6 и ВК6М. В экспериментах использовали сборный ролик радиусом $r_p = 40$ мм с тремя сменными зубчатыми вставками. В качестве критерия затупления зубьев принимали ширину площадки износа $h_{\text{зк}}$ (рис. 7), равную 1 мм. Данные о стойкости на рис. 6 получены осреднением 9–15 опытных значений критического износа зубчатых элементов.

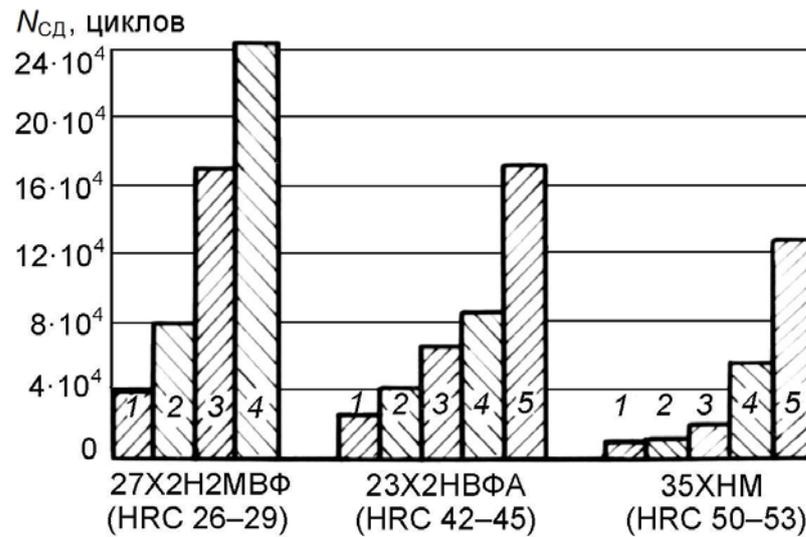


Рис. 6. Диаграмма количества $N_{сд}$ циклов внедрения зубьев накатного ролика, изготовленных из различных материалов, при обтачивании термически обработанных сталей 27X2H2MVФ, 23X2HВФА и 35XНМ ($v_0 = 0,3 - 1,5$ м/с, $S_0 = 0,21$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $P_0 = 2,4$ кН; $\alpha_3 = 120^\circ$):

1 – ШХ15; 2 - ХВГ; 3 – P6M5; 4 – BK6; 5 – BK6OM

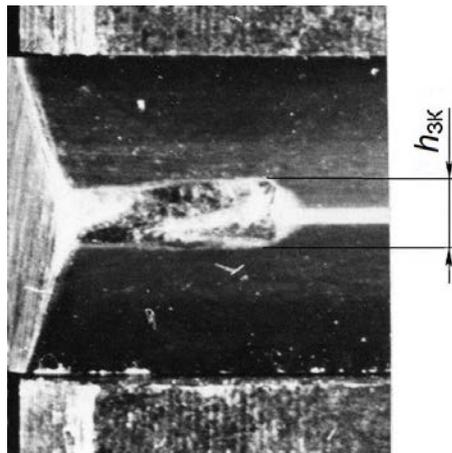


Рис. 7. Вид износа зубьев накатного ролика

Из диаграммы на рис. 6 видно, что наиболее высокую износостойкость (количество $N_{сд}$ циклов внедрения зубьев ролика до затупления) имеют зубья из твердых сплавов BK6 и BK6OM.

Продолжительность работы зубчатых элементов накатного ролика до критической величины износа при непрерывной работе на станке определяется зависимостью

$$T_{сд} = \pi r_p N_{сд} / 3 \cdot 10^4 v, \text{ мин,}$$

где v – скорость резания, м/с.

Таким образом, время $T_{сд}$ работы зубчатых вставок из BK6 и BK6OM до переточки при точении на скорости резания $v = 0,3$ м/с высокопрочной стали 35XНМ составляет 350 и 800 мин соответственно. Большое влияние на стойкость зубчатых элементов оказывает

структура инструментального материала: работоспособность особомелкозернистого твердого сплава ВК6ОМ значительно (до 2,3 раза) выше, чем сплава ВК6. При обработке материалов с относительно невысокой твердостью (до HRC 30) зубья ролика можно изготавливать из быстрорежущей стали, обеспечивая при этом $T_{СД} = 1000$ мин и более.

Решающее влияние на работоспособность зубьев ролика при точении легированных закаленных сталей оказывает твердость обрабатываемого материала. Так, при обтачивании сталей 23Х2НВФА (HRC 42–45) и 35ХНМ (HRC 50–53) стойкость зубчатых вставок из всех опробованных материалов снижается соответственно в 1,5-4 и 4,5-10 раз по сравнению со стойкостью при обработке стали 27Х2Н2МВФ (HRC 26–29).

Химический состав обрабатываемых закаленных сталей с низким содержанием легирующих элементов имеет второстепенное значение. Так, на рис. 8 представлены результаты стойкостных испытаний зубьев при точении стали 35ХНМ различной твердости, а также данные по стойкости для сталей 27Х2Н2МВФ и 23Х2НВФА. Как видно, для разных марок обрабатываемого материала с одинаковой твердостью значения стойкости зубьев практически совпадают.

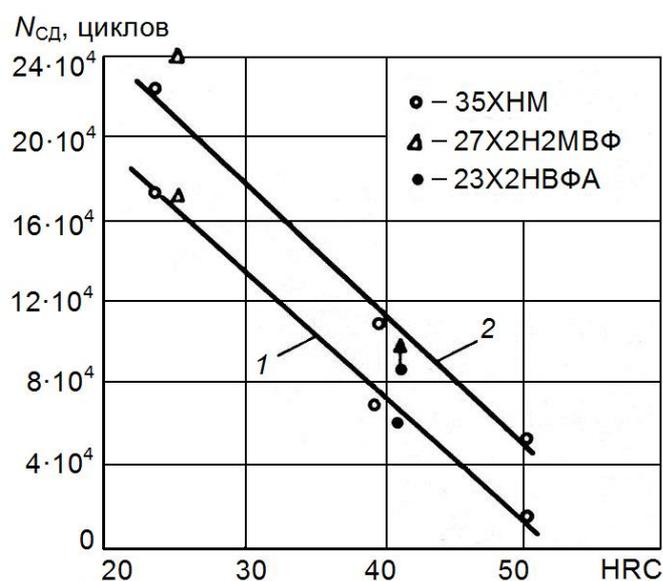


Рис. 8. Зависимость количества $N_{сд}$ циклов внедрения зубьев накатного ролика от твердости HRC обрабатываемого материала (условия обработки те же, что на рис. 6)
1 – Р6М5; 2 – ВК6

Продолжительность работы зубчатых элементов ролика без переточки (до 10–20 ч и более) обеспечивает достаточно высокую эффективность дробления стружки при резании с ОПД.

Таким образом, метод ОПД рекомендуется в данном случае не только как технологический способ повышения качества и технико-экономических показателей изготовления продукции, но одновременно и как средство повышения эффективности утилизации отходов производства в виде стружки, исключая необходимость ее дробления на специальном оборудовании при подготовке к переплавке.

В случаях низкой рентабельности применения метода ОПД (единичное производство, малогабаритные детали сложной формы, особые требования к характеристикам поверхностного слоя) повышение эффективности технологического

процесса переработки стружки с высокими физико-механическими свойствами можно обеспечить путем применения разупрочняющей термической обработки, предшествующей ее дроблению на специальном оборудовании. Используемые промышленностью в настоящее время технологии подготовки стружки для плавки или экспорта применяют термическую обработку только на этапе горячего брикетирования.

Список литературы

1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа, 1974. 587 с.
2. Черная металлургия зарубежных стран и России : Научные труды / Под общ. ред. В.В. Катунина. М.: Черметинформация, 2001. 319 с.
3. Талантов Н.В., Тананин А.И. Исследование кинематики и процесса пластического деформирования контактных слоев стружки // Совершенствование процессов резания и повышение точности металлорежущих станков : сб. Ижевск: Изд-во Ижевского механического института, 1969. С. 4-22.
4. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
5. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. Томск: СТТ, 2001. 180 с.
6. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. 455 с.
7. Zlatin N., Merchant M. Hardness Distribution in Chip and Machined Surfaces // Iron Age. 1947. Vol. 159, no. 21. P. 773-781.
8. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
9. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. 264 с.
10. Ярославцев В.М. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием : а. с. № 407648 СССР. 1974. Бюл. № 47.
11. Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием: учеб. пособие по курсу «Перспективные технологии реновации». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 46 с.
12. Ярославцев В.М. Определение оптимальных режимов накатки роликом при точении с опережающим пластическим деформированием // Известия вузов. Машиностроение. 1980. № 10. С. 124-127.
13. Ярославцев В.М., Талаев А.Н. Стойкость зубьев накатного ролика при точении с опережающим пластическим деформированием и стружкодроблением // Станки и инструмент. 1976. № 3. С. 18-19.

Cutting with outrunning plastic deformation in technologies of utilization of metal chips

07, July 2013

DOI: 10.7463/0713.0567548

Yaroslavtsev V.M.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
mt13@bmstu.ru

The author considers different possibilities of increasing efficiency of processing of metal chips during utilization by means of crushing them with the use of machine-tools while processing work pieces. It was shown that application cutting with outrunning plastic deformation (OPD) during the processing provides both reliable crushing of flow chips and high technological and technical-and-economic parameters of the processing. Cutting with OPD and crushing of metal chips allows to eliminate one of the most time-consuming operations of utilization – that is granulating with the use of special equipment before briquetting and remelting. Experimental data on durability of toothed elements of crusher rolls that are used for crushing metal chips during the processing with OPD are presented. Recommendations are given on selection of a material for toothed elements and of their geometry, depending on properties of the material to be processed. It was established that application of elements made of hard alloy of VK6, VK6OM allowed them to work without regrinding for more than 20 hours.

Publications with keywords: [recycling](#), [split shavings](#), [wear resistance](#), [metal shavings](#), [cutting with anticipatory of plastic deformation](#), [a toothed roller](#), [the efficiency of the recycling of shavings](#)

Publications with words: [recycling](#), [split shavings](#), [wear resistance](#), [metal shavings](#), [cutting with anticipatory of plastic deformation](#), [a toothed roller](#), [the efficiency of the recycling of shavings](#)

References

1. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting demanding materials]. Moscow, Vysshaya shkola, 1974. 587 p.
2. Katunin V.V., ed. *Chernaya metallurgiya zarubezhnykh stran i Rossii : Nauchnye trudy* [Ferrous metallurgy of foreign countries and Russia: Scientific works]. Moscow, Chermetinformatsiya, 2001. 319 p.
3. Talantov N.V., Tananin A.I. Issledovanie kinematiki i protsessa plasticheskogo deformirovaniya kontaknykh sloev struzhki [Study of kinematics and the process of plastic deformation of contact layers of chips]. *Sovershenstvovanie protsessov rezaniya i povyshenie*

- tochnosti metallorazhushchikh stankov : sb.* [Improvement of the processes of cutting and increasing the accuracy of machine tools : collection of papers]. Izhevsk, Izhevsk Mechanical Institute Publ., 1969, pp. 4-22.
4. Del' G.D. *Oprezhenie napryazheniy v plasticheskoy oblasti po raspredeleniyu tverdosti* [The definition of stress in plastic field on distribution of hardness]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 200 p.
 5. Gol'dshmidt M.G. *Deformatsii i napryazheniya pri rezanii metallov* [Strains and stresses at cutting of metals]. Tomsk, STT Publ., 2001. 180 p.
 6. Klushin M.I. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow, Mashgiz, 1958. 455 p.
 7. Zlatin N., Merchant M. Hardness Distribution in Chip and Machined Surfaces. *Iron Age*, 1947, vol. 159, no. 21, pp. 773-781.
 8. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 304 p.
 9. Makarov A.D. *Iznos i stoikost' rezhushchikh instrumentov* [Wear and resistance of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie, 1966. 264 p.
 10. Iaroslavtsev V.M. *Sposob obrabotki rezaniem s operezhaiushchim plasticheskim deformirovaniem* [Method of machining with advanced plastic deformation]. USSR Author's Certif., no. 407648, 1974.
 11. Iaroslavtsev V.M. *Rezanie s operezhaiushchim plasticheskim deformirovaniem* [Cutting with advanced plastic deformation]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 46 p.
 12. Yaroslavtsev V.M. Oprezhenie optimal'nykh rezhimov nakatki rolikom pri tochenii s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Determination of the optimal modes of knurling by roller when turning with advanced plastic deformation]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1980, no. 10, pp. 124-127.
 13. Yaroslavtsev V.M., Talaev A.N. Stoykost' zub'ev nakatnogo rolika pri tochenii s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem i struzhkodrobleniem [Durability of teeth of knurling roller when turning with advanced plastic deformation and chips crushing]. *Stanki i instrument*, 1976, no. 3, pp. 18-19.