

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОГО ТОЧЕНИЯ СТАЛИ ХВГ

© 2018

*Д.А. Расторгуев*, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств»  
*А.А. Севастьянов*, студент Института машиностроения  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** твердое точение; сталь ХВГ; стружкообразование; режимы резания; типы стружки; стружка надлома; сливная стружка; стружка переходного типа; качество поверхности; станки с ЧПУ.

**Аннотация:** Представлены результаты эксперимента по обработке кольцевых заготовок из стали ХВГ, предварительно закаленных до твердости HRC 55. Данный материал применяется для изготовления режущего и мерительного инструмента с высокими требованиями к точности размеров и отсутствию коробления после термической обработки. Эксперимент представлял собой подрезку торца кольца на станке модели 16Б16Т1С1 резцом, оснащенный пластиной из кубического нитрида бора без применения смазывающе-охлаждающей жидкости. В ходе трехфакторного эксперимента варьировали скорость резания, подачу и глубину резания. Для более широкого промышленного применения твердое точение требует дополнительных исследований, связанных с изучением особенностей формирования стружки, выявления зависимостей сил резания и температуры в зоне резания от режима обработки. Исследовался процесс стружкообразования и качество обработанной поверхности. Проведена систематизация видов стружки в зависимости от режимов резания. Основным технологическим фактором, определяющим вид стружки, является скорость резания. При ее возрастании вид стружки меняется от сливной, через переходную форму, к стружке надлома. При увеличении вида стружки видно отчетливое разделение стружки на сегменты. Они при увеличении скорости резания становятся более выраженными, что ведет к изменению ее характера. При критическом значении скорости стружка от элементной переходит к стружке надлома. Динамическая составляющая силы резания, связанная с процессом стружкообразования, при этом растет. Такое изменение динамики процесса резания сопровождается соответствующими следами от инструмента на обработанной поверхности. Устойчивый характер стружкообразования способствует формированию поверхности с регулярным микрорельефом минимальной высоты. Повышение динамичности стружкообразования при увеличении скорости резания приводит к формированию муара на обработанной поверхности. Выявлены оптимальные с точки зрения производительности, качества поверхности и типа стружки режимы обработки. Полученные результаты могут быть использованы для организации автоматизированного производства с использованием станков с ЧПУ и автоматических линий.

**ВВЕДЕНИЕ**

На сегодняшний день в машиностроении, в том числе в автомобильном, наметилась тенденция перехода к использованию высокопрочных и твердых материалов. Обработка таких заготовок представляет собой сложный технологический процесс, требующий в классическом исполнении применения малопроизводительного и дорогого шлифовального оборудования. Шлифовальные операции проводятся, как правило, с использованием смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), что относит их к области экологически вредных производств. К тому же они имеют ограничение по номенклатуре обрабатываемых изделий и поверхностей. С целью повышения производительности и снижения себестоимости продукции предприятия используют технологию «сухой» и твердой лезвийной обработки металлов, частным случаем которой является твердое точение [1; 2]. Повсеместное внедрение данного метода обработки в промышленности затруднено ввиду отсутствия достаточного количества экспериментальных данных, справочной информации. Исследование призвано частично восполнить существующую нехватку информации о твердом точении.

Процесс твердого точения имеет ряд особенностей, отличающих его от обработки пластичных материалов. Это связано с тепловым потоком, который локализуется в зоне сдвига. В работе [3] приводятся результаты экспериментальных данных, свидетельствующих о зависимости силы резания от вида подложки режущего ин-

струмента, при помощи которой регулировали теплоотвод от реза. Различие сил резания составило 40%. Жесткость технологической системы должна быть высокой, причем по всем осям, не только для исключения автоколебаний, но и для сохранения заданной точности обработки, что в условиях твердого точения выполнить сложнее из-за больших сил резания [4].

Устойчивость процесса обработки определяется конкретным температурным режимом в зоне резания, нарушение которого из-за изменения физико-механических свойств материала заготовки может привести к автоколебаниям. Поэтому для устойчивого процесса резания температурный режим в зоне резания должен быть стабильным. В работе [5] даны результаты исследования зависимостей силы резания от режимов обработки по твердому точению для ряда материалов, включая сталь ХВГ с твердостью до HRC 50. Для скоростей резания всех материалов наблюдается минимум силы резания для значений в районе 370..400 м/мин. Для управления температурным режимом обработки с целью снижения шероховатости и повышения стойкости могут использоваться резы со встроенной системой охлаждения [6]. Одним из диагностических каналов процесса твердого точения может быть виброакустическая диагностика [7; 8], которая применяется для контроля состояния инструмента.

В работе [9] исследован процесс твердого точения стали ХВГ с оптимизацией режимов обработки при помощи инструмента из высокопрочной композиционной

керамики. Зависимости ограничений даются без учета размерностей и без конкретизации рабочих диапазонов режима обработки.

Формально к твердому точению исследование [10] не относится, так как твердое точение проводится для заготовок с твердостью выше 45 HRC [11], а в работе рассматривается точение стали, закаленной до HRC 40. Но полученные в [10] зависимости характерны для твердого точения. Зависимость шероховатости от глубины резания и подачи типичная: при их увеличении численное значение шероховатости  $Ra$  возрастает. От скорости резания зависимость шероховатости имеет минимум при 430 м/мин. Увеличение шероховатости с дальнейшим ростом скорости резания объясняется повышением колебаний станка из-за увеличения скорости резания. Но, как показали многочисленные исследования, при высоких скоростях резания характер стружкообразования меняется [12–14].

Для твердого точения характерен вид стружки надлома. Причем сплошность стружки, которая определяется отношением общей высоты стружки к ее сплошной части, прилегающей к передней поверхности инструмента, снижается с ростом скорости резания. Деформация сдвига по плоскости сдвига становится более интенсивной. Зона стружкообразования становится источником динамических возмущений по отношению к системе станка. Если учесть, что частота стружкообразования, т. е. формирования отдельных сегментов, одного порядка с собственной частотой резца, возникают резонансные явления.

Для обеспечения качества обработанной поверхности и стойкости инструмента сочетание частоты стружкообразования и собственной частоты элемента станка является критическим фактором. Выбор технологического режима (глубины резания, подачи, скорости резания) должен определяться противоположными критериями: производительностью и качеством поверхности [10; 12; 13]. При этом необходимо обеспечить оптимальный стружкоотвод, так как предполагается автоматизация обрабатывающих процессов при повышении стойкости инструмента. Частотные зависимости силы резания, колебаний, частоты стружкообразования имеют сложный нелинейный характер.

Проводились исследования по определению доминирующей частоты в спектре изменения силы резания или частоты колебаний резца, регистрируемых по сигналам от динамометра или акселерометров соответственно [11]. Частоту стружкообразования вычисляли по шагу стружки с учетом коэффициента утолщения. Зависимость этой частоты от технологических режимов не всегда аналогична зависимости доминирующих частот в спектре силы резания или колебаний резца. Например, при увеличении подачи доминирующая частота в спектре силы резания снижается, а рассчитанная частота стружкообразования имеет экстремальный характер. Оптимальное значение шероховатости достигается на скоростях резания ниже максимальной [14]. С температурными же эффектами связано влияние твердости материала заготовки на шероховатость. Чем тверже поверхность, тем меньше шероховатость.

Качество поверхности определяется не только шероховатостью, волнистостью, но и остаточными технологическими напряжениями. При моделировании методом

конечных элементов образования остаточных напряжений при обработке закаленной стали получены сжимающие остаточные напряжения, которые растут с увеличением всех технологических параметров [16]. Для ограниченного диапазона скорости резания (до 220 м/мин) при обработке стали AISI 4340 (HRC 49) зависимость шероховатости от этого параметра падающая [17]. Морфология стружки во всем диапазоне технологических режимов элементная пилообразная. Меняются ее макропризнаки, стружка принимает винтовую или ленточную форму.

В работе [18] рассмотрена методика оптимизации технологических режимов для обеспечения минимальной шероховатости при максимальной производительности. Для обеспечения шероховатости указываются определяющие факторы: скорость резания и подача, а для производительности – глубина резания. Управление температурным полем с использованием криогенных технологий свидетельствует о зависимости частоты стружкообразования от твердости материала [19]. Охлаждение в зоне резания из-за устранения эффекта разупрочнения с ростом скорости приводит к увеличению силы резания и повышению частоты стружкообразования. Эксперименты показывают, что уровень остаточных технологических напряжений при твердом точении снижается [20]. Зависимость силы резания от скорости резания падающая из-за разупрочнения материала.

Цель работы – определение оптимальных режимов твердого точения стали ХВГ по критериям производительности, качеству поверхности и параметрам стружкообразования.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведен эксперимент на токарном станке с ЧПУ модели 16Б16Т1С1 с системой ЧПУ FlexNC. В качестве заготовок использовали кольца из стали ХВГ ГОСТ 5950-2000 твердостью 55 HRC с наружным диаметром 55 мм, внутренним диаметром 30 мм, толщиной 20 мм. Химический состав стали ХВГ приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав ХВГ

C	0,9–1,05
Si	0,1–0,4
Mn	0,8–1,1
Ni	до 0,35
S	до 0,03
P	до 0,03
Cr	0,9–1,2
Mo	до 0,3
W	1,2–1,6
Cu	до 0,3
Fe	~94

Физико-механические свойства ХВГ: твердость 55 HRC, предел прочности  $\sigma_B=760$  МПа.

Торцовую обработку образцов проводили инструментом PCLNR 2525M 12, пластина NP-CNGA120404GA2 Mitsubishi, материал пластины – кубический нитрид бора (КНБ). В процессе обработки

Таблица 2. Режимы обработки

№ образца	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$t$ , мм	№ образца	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$t$ , мм
1	150	0,1	0,1	25	150	0,2	0,1
2	150	0,1	0,2	26	150	0,2	0,2
3	150	0,1	0,3	27	150	0,2	0,3
4	250	0,1	0,1	28	150	0,2	0,4
5	250	0,1	0,2	29	250	0,2	0,1
6	250	0,1	0,3	30	250	0,2	0,2
7	250	0,1	0,4	31	250	0,2	0,3
8	250	0,3	0,1	32	250	0,2	0,4
9	250	0,3	0,2	33	300	0,2	0,1
10	250	0,3	0,3	34	300	0,2	0,2
11	250	0,3	0,4	35	300	0,2	0,3
12	300	0,1	0,1	36	300	0,2	0,4
13	300	0,1	0,2	37	400	0,1	0,1
14	300	0,1	0,3	38	400	0,1	0,2
15	300	0,1	0,4	39	400	0,1	0,3
16	300	0,3	0,1	40	400	0,1	0,4
17	300	0,3	0,2	41	400	0,3	0,1
18	300	0,3	0,3	42	400	0,3	0,2
19	300	0,3	0,4	43	400	0,3	0,3
20	150	0,3	0,1	44	400	0,3	0,4
21	150	0,3	0,2	45	400	0,2	0,1
22	150	0,3	0,3	46	400	0,2	0,2
23	150	0,3	0,4	47	400	0,2	0,3
24	150	0,1	0,4	48	400	0,2	0,4

Примечание:  $v$  – скорость резания на внешнем диаметре, м/мин;  $s$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм.

СОЖ не использовалась. Режимы обработки представлены в таблице 2.

Получены фотографии обработанной поверхности и фрагментов стружки с увеличением  $\times 4$ ,  $\times 10$  и  $\times 40$  с использованием оптического микроскопа «Лабомет». Данные фотографии использованы для анализа качества обработанной поверхности по критерию размеров следов вибраций, а также анализа типа и формы стружки. На всех фотографиях обработанных поверхностей явно представлены следы от вершины резца, движущегося по направлению поперечной подачи. Качество поверхности оценивалось по фотографиям с увеличением  $\times 40$  следующим образом: высокое качество – для образцов без видимых следов вибраций (поперечных рисок), среднее – для образцов с едва заметными следами вибраций (неглубокие, узкие поперечные риски) и низкое – для образцов со следами сильных ударов (заметные неоднородные углубления на всей поверхности). Высота риска в оценке качества поверхности не учитывалась. Оценка производилась субъективно визуально, без количественных параметров. Если по оценке образца возникали разногласия, оценка давалась средняя.

В процессе обработки производилась запись сигналов диагностической системы ЧПУ станка, в частности, получены значения силы тока привода главного движения станка с частотой дискретизации 227 Гц (рис. 1). Двигатель главного привода станка – АИР132S4У3. Сбор сигнала осуществлялся в системе РМАС. Регистрировались показания с момента включения до момента выключения станка. На графике явно видны пиковые нагрузки в моменты включения и выключения. При выходе на установившийся режим работы (5 с) сиг-

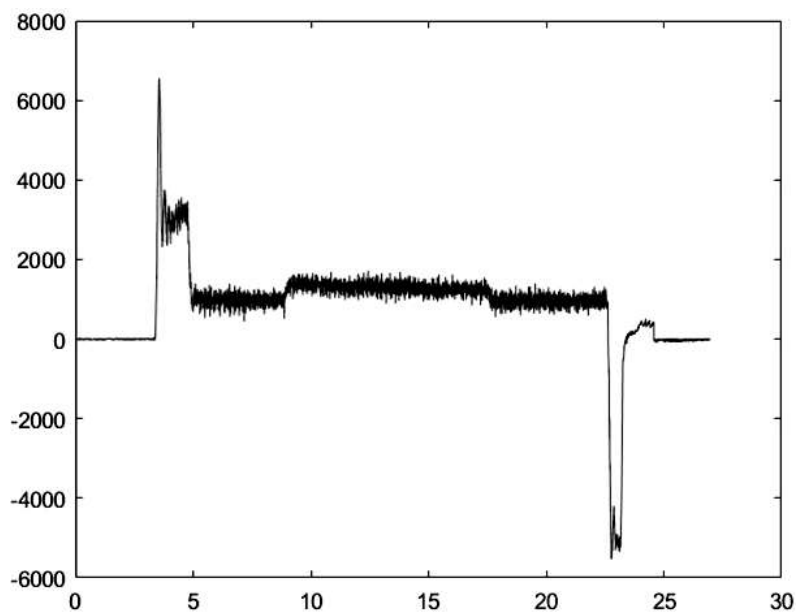
нал показывает уровень нагрузки на холостом ходу. С 9 с начинается процесс резания. Токовая нагрузка возрастает скачком и постепенно снижается из-за уменьшения скорости резания по мере перемещения резца радиально к оси заготовки.

Параметры токовых нагрузок привода главного движения токарного станка с ЧПУ позволяют судить о силах резания, возникающих в ходе обработки заготовок на разных режимах. Путем сопоставления значений токовых нагрузок можно прийти к зависимости сил резания от скорости резания, глубины резания и подачи. Оценка статической составляющей силы резания проводится по величине скачка от среднего значения токовой нагрузки холостого хода. Размах сигнала позволяет судить о динамической составляющей силы резания.

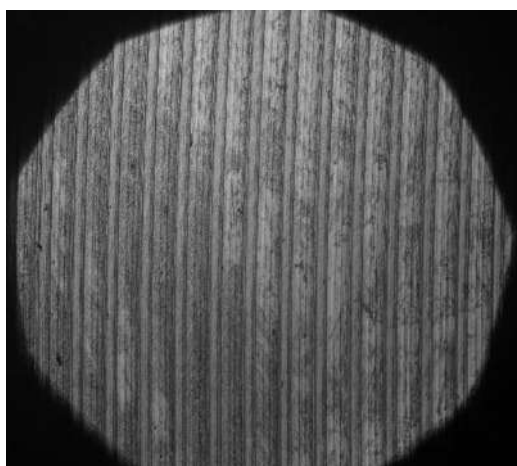
Формирование обработанной поверхности и силы резания связаны с процессом стружкообразования. Поэтому проводилась фотосъемка стружки с ее последующей классификацией по виду для каждого эксперимента.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

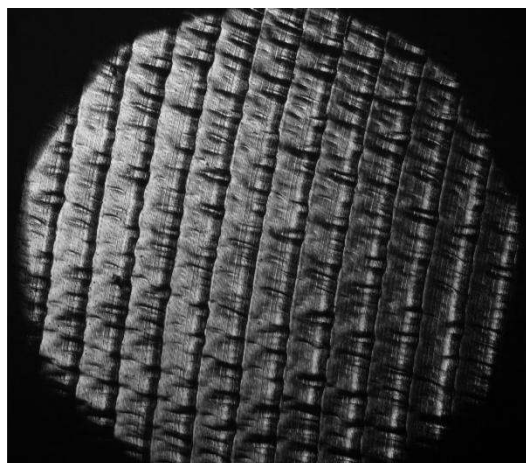
В ходе анализа данных эксперимента особое внимание уделено качеству обработанной поверхности, а также типу получившейся при резании стружки. Поверхность по качеству делилась на «чистую», переходную и с «муаром» (рис. 2, рис. 3). Оценка проводилась визуально по фотографиям с максимальным увеличением поверхности. «Муар» является признаком поверхности низкого качества и отличается не только повышенной шероховатостью, но и заметной неоднородностью микронеровностей.



*Рис. 1. График силы тока привода шпинделя от времени*



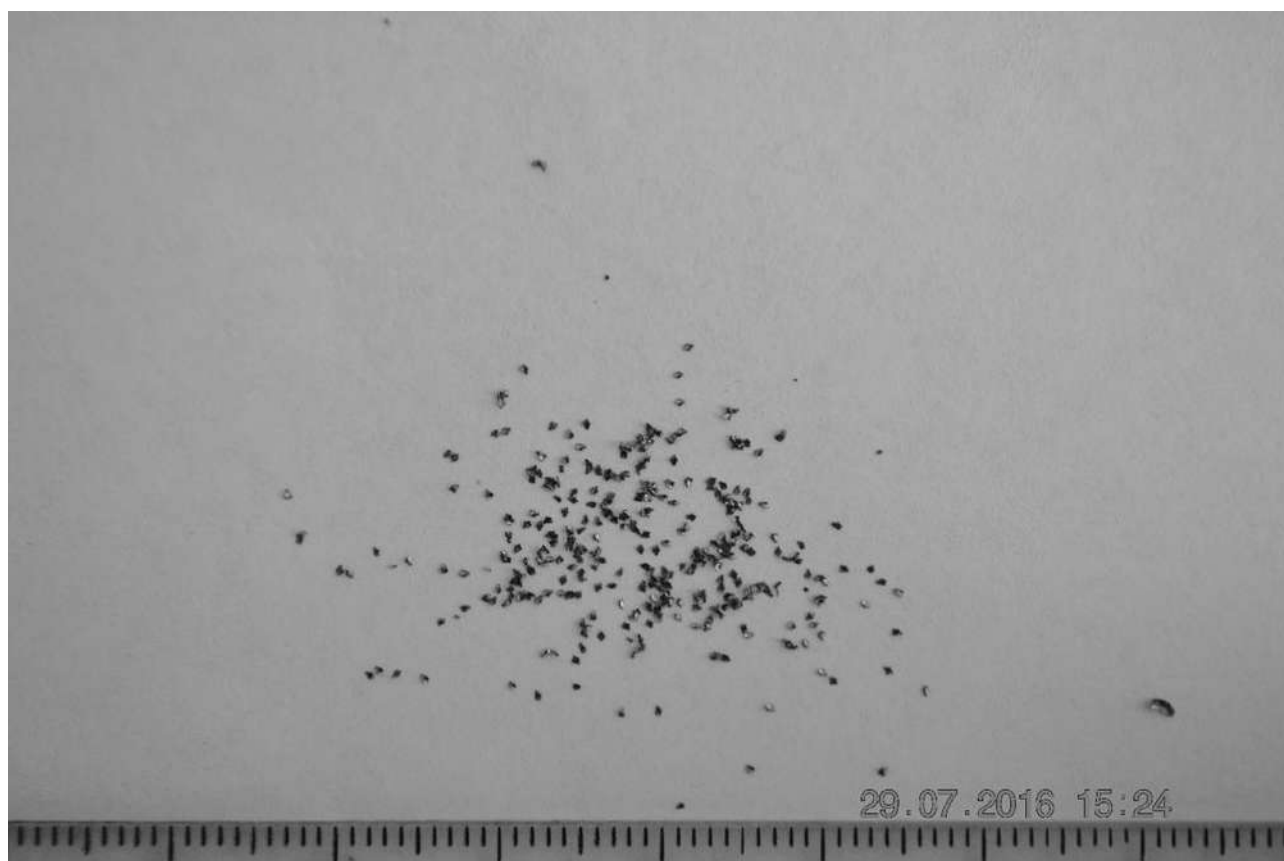
*Рис. 2. Чистая поверхность*



*Рис. 3. Поверхность со следами вибраций*



*Рис. 4. Сливная стружка*



*Рис. 5. Стружка элементная (надлома)*

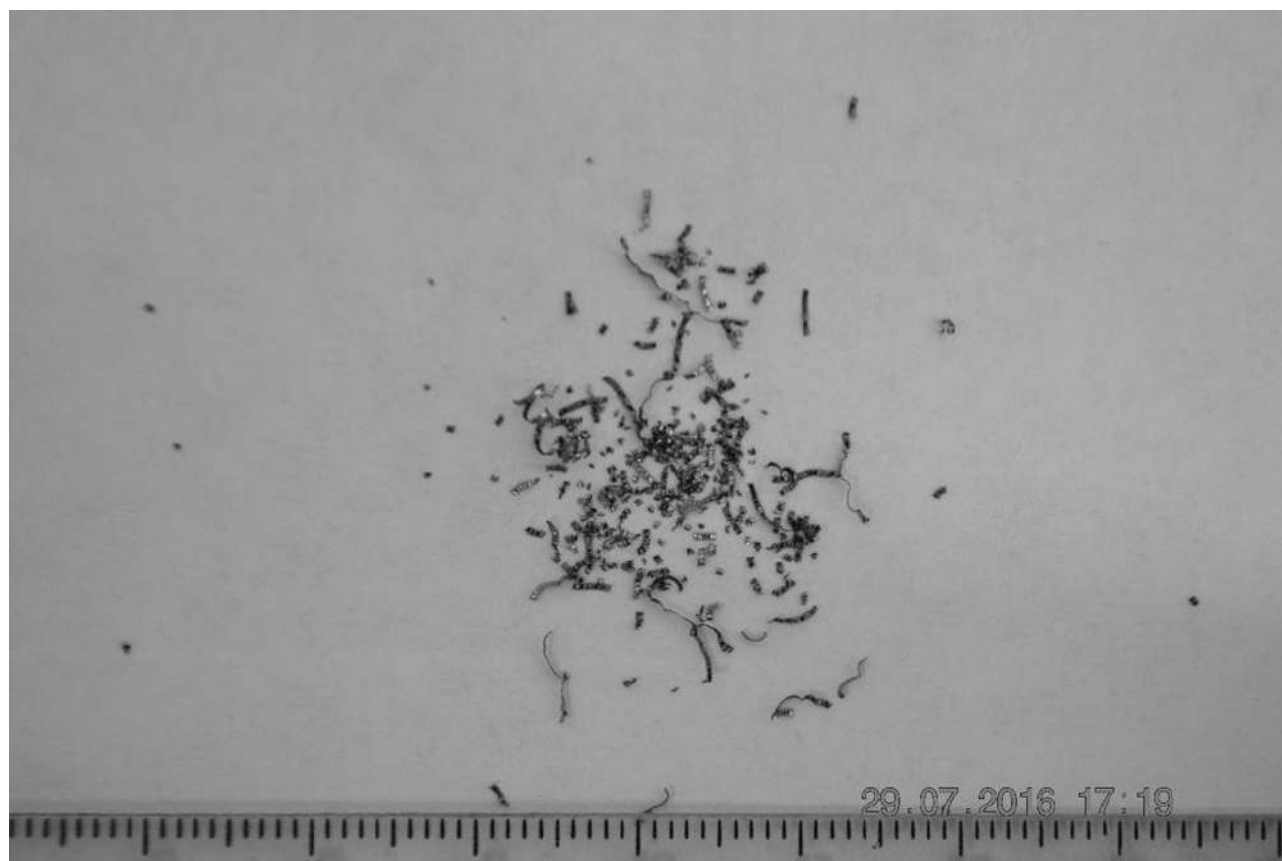


Рис. 6. Стружка переходного типа

Стружка делилась на сливную ленточного типа, элементную (надлома) и переходного типа (рис. 4–6). При обработке закаленных сталей в большинстве случаев получается стружка переходного типа с явно выраженной пилообразной формой [11–13]. На низких режимах резания (опыты № 1, 25) процесс стружкообразования устойчивый. Тип стружки сливной (№ 25) или переходный (№ 1), причем сливная стружка в данном случае представляет собой сильно связанные по плоскостям сдвига, но четко выделенные сегменты менее деформированного материала стружки. При увеличении толщины срезаемого слоя стружка становится более связанной, и длина непрерывной стружки повышается. При максимальной площади срезаемого слоя (опыты № 23, 44) тип стружки элементный. Из-за предельной деформации в плоскости сдвига стружка распадается на отдельные сегменты.

Рост скорости резания ведет к повышению температуры и скорости деформации в плоскости сдвига, что также снижает сплошность стружки и при предельных параметрах приводит к формированию стружки надлома. Усиление цикличности формирования стружки с ее полным разделением на отдельные сегменты приводит к повышению динамической составляющей силы резания. Сигнал токовой нагрузки свидетельствует об усилении размаха динамической составляющей силы резания. Процесс стружкообразования проходит на частотах порядка несколько тысяч герц, что сопоставимо с собственной частотой резца, закрепленного в резцедержателе. При усилении динамичности в зоне стружкообразования, что сопровождается соответствующими изме-

нениями в силе резания, происходит повышение уровня относительных колебаний резца и заготовки. С учетом высоких частот стружкообразования на максимальной скорости резания, которые близки к собственной частоте колебаний резца, происходит рост амплитуды колебаний инструмента. После обработки при сочетании параметров режимов, где хотя бы один фактор находится на максимальном уровне (кроме опыта № 37, где скорость резания максимальная), наблюдается низкое качество поверхности и стружка, как правило, элементная. Это однозначно свидетельствует о том, что без назначения рациональных режимов обработки, обеспечивающих устойчивый процесс стружкообразования, нужного качества поверхности добиться невозможно.

Сводные результаты для восьми характерных образцов приведены в таблице 3.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В ходе анализа результатов эксперимента выявлена связь между параметрами стружки, качеством обработанной поверхности и силой тока в приводе шпинделя станка. Наиболее производительными и в то же время оптимальными с точки зрения качества обработанной поверхности оказались режимы с  $v_1=400$  м/мин,  $s_1=0,1$  мм/об и  $t_1=0,3$  мм;  $v_2=300$  м/мин,  $s_2=0,1$  мм/об и  $t_2=0,4$  мм. При этом рекомендуемое производителем режущего инструмента значение скорости резания для данной комбинации обрабатываемого и обрабатывающего материала ниже 400 м/мин, однако в ходе эксперимента показано, что даже при превышении рекомендуемой

Таблица 3. Сводные результаты для характерных образцов исследования

№	$v$ , м/мин	$s$ , мм/об	$t$ , мм	Качество поверхности	Тип стружки
1	150	0,1	0,1	Высокое	Переходная
25	150	0,2	0,1	Высокое	Сливная
23	150	0,3	0,4	Низкое	Элементная
15	300	0,1	0,4	Среднее	Элементная
37	400	0,1	0,1	Высокое	Переходная
39	400	0,1	0,3	Среднее	Переходная
48	400	0,2	0,4	Низкое	Элементная
44	400	0,3	0,4	Низкое	Элементная

скорости резания качество обработанной поверхности является приемлемым.

2. При обработке твердым точением необходимо обязательно согласовывать параметры зоны резания (частоту стружкообразования через температуру и деформацию в зоне сдвига, деформационные процессы и трение по площадкам контакта «стружка – резец», «заготовка – резец»), определяемые технологическим режимом и параметрами обработанной поверхности (шероховатостью, волнистостью, остаточными технологическими напряжениями). Это согласование определяется динамикой взаимодействия процесса резания с колебаниями элементов упругой системы станка, в первую очередь резца. Синхронизация сдвиговых процессов в стружке с собственной частотой подсистемы станка вызывает значительные динамические возмущения с потерей качества обработки и снижением стойкости инструмента. Возрастание интенсивности сдвиговых деформационных процессов при росте технологических режимов является ограничительным фактором для производительности. Обязательно необходим учет особенностей морфологии стружки для облегчения ее удаления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Попиков А.Н. Исследование процесса твердого точения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12. № 4. С. 24–29.
2. Грубый С.В., Лапшин В.В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 6. С. 61–76.
3. Козочкин М.П., Селезнев А.Е. Исследование виброакустического сигнала в момент врезания при обработке закаленных сталей // Вестник МГТУ Станкин. 2015. № 4. С. 52–58.
4. Трофимов В.В., Несмеянов Е.А. Регулирование амплитуды колебаний инструмента при обработке на многошпиндельных станках для твердого точения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 61–65.
5. Пронин А.И., Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Мыльников В.В. Исследование силы резания при обработке закаленных сталей точением // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 4. С. 63–66.
6. Кузнецов В.П., Скоробогатов А.С., Воропаев В.В., Петунин А.А. Исследование твердого точения наплавленной поверхности инструментом с замкнутой системой теплоотвода от сменной пластины // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 169–174.
7. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Селезнев А.Е. Виброакустический мониторинг лезвийной обработки заготовок из закаленной стали // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 1. С. 23–30.
8. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Попиков А.Н. Виброакустическая диагностика при твердом точении // Вестник МГТУ Станкин. 2009. № 1. С. 23–29.
9. Сотова Е.С., Лазарева Е.М. Повышение эффективности резания закаленной стали путем применения режущего инструмента из высокопрочной композиционной керамики с покрытием // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 2. № 2. С. 184–189.
10. Пронин А.И., Мыльников В.В., Чернышов Е.А. Исследование влияния параметров обработки на шероховатость поверхности деталей из закаленной стали 40X при точении режущей керамикой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 8. С. 41–45.
11. Rigal J.F., Zarcu M., Mabrouki T., Belhadi S. Saw tooth chip formation in hard turning and the approach to separate process segmentation and machine assembly vibration frequencies // Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS. USA: Editura Academiei Române, 2006. P. 133–136.
12. Bouacha K., Yallese M.A., Khamel S., Belhadi S. Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool // Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2014. Vol. 45. P. 160–178.
13. Mabrouki T., Courbon C., Zhang Y., Rech J., Nélias D., Asad M., Hamdi H., Belhadi S., Salvatore F. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations // Comptes rendus mecanique. 2016. Vol. 344. № 4-5. P. 335–354.
14. Azizi M.W., Belhadi S., Yallese M.A., Mabrouki T., Rigal J.-F. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26. № 12. P. 4105–4114.

15. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005. Vol. 219. № 7. P. 515–524.
16. Caruso S., Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Modeling and experimental validation of the surface residual stresses induced by hard machining of AISI H13 tool steel // *International journal of material forming*. 2010. Vol. 3. Supply 1. P. 515–518.
17. Das S.R., Panda A., Dhupal D. Experimental investigation of surface roughness, flank wear, chip morphology and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with coated carbide insert // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017. Vol. 3. P. 1–15.
18. Tebassia H., Yallesea M.A., Belhadi S., Girardin F., Mabrouki T. Quality-productivity decision making when turning of Inconel 718 aerospace alloy: A response surface methodology approach // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2017. Vol. 8. № 3. P. 347–362.
19. Kim D.M., Kim D.Y., Banerjee N., Park H.W. Predictive modeling for the cryogenic cooling condition of the hard turning process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Article in press.
20. Ko T.J., Kim H.S. Surface Integrity and Machineability in Intermittent Hard Turning // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2001. Vol. 18. № 3. P. 168–175.
7. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Seleznev A.E. Vibroacoustic monitoring of cutting edge machining of hardened steel. *Vestnik MGTU Stankin*, 2018, no. 1, pp. 23–30.
8. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Popikov A.N. Vibroacoustic diagnostics of hard turning. *Vestnik MGTU Stankin*, 2009, no. 1, pp. 23–29.
9. Sotova E.S., Lazareva E.M. Increasing of cutting efficiency of heat-treated steel through the application of cutting tools of high-strength composite ceramic with coating. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 184–189.
10. Pronin A.I., Mylnikov V.V., Chernyshov E.A. A Study of the Influence of Machining Parameters on the Surface Roughness of the 40Kh Tempered Steel Parts when Turning by Ceramic Cutters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2017, no. 8, pp. 41–45.
11. Rigal J.F., Zapciu M., Mabrouki T., Belhadi S. Saw tooth chip formation in hard turning and the approach to separate process segmentation and machine assembly vibration frequencies. *Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS. USA*, Editura Academiei Române Publ., 2006, pp. 133–136.
12. Bouacha K., Yallese M.A., Khamel S., Belhadi S. Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool. *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 160–178.
13. Mabrouki T., Courbon C., Zhang Y., Rech J., Nélías D., Asad M., Hamdi H., Belhadi S., Salvatore F. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations. *Comptes rendus mecanique*, 2016, vol. 344, no. 4-5, pp. 335–354.
14. Azizi M.W., Belhadi S., Yallese M.A., Mabrouki T., Rigal J.-F. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, no. 12, pp. 4105–4114.
15. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. 219, no. 7, pp. 515–524.
16. Caruso S., Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Modeling and experimental validation of the surface residual stresses induced by hard machining of AISI H13 tool steel. *International journal of material forming*, 2010, vol. 3, supply 1, pp. 515–518.
17. Das S.R., Panda A., Dhupal D. Experimental investigation of surface roughness, flank wear, chip morphology and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with coated carbide insert. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, vol. 3, pp. 1–15.
18. Tebassia H., Yallesea M.A., Belhadi S., Girardin F., Mabrouki T. Quality-productivity decision making when turning of Inconel 718 aerospace alloy: A response surface methodology approach. *International*

#### REFERENCES

1. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Popikov A.N. Investigation of solid turned. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 24–29.
2. Grubby S.V., Lapshin V.V. Research of cutting properties of boron nitride cutters. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*, 2012, no. 6, pp. 61–76.
3. Kozochkin M.P., Seleznev A.E. Research of vibroacoustic signal at moment of penetration during processing of hardened steels. *Vestnik MGTU Stankin*, 2015, no. 4, pp. 52–58.
4. Trofimov V.V., Nesmeyanov E.A. Regulation of amplitude of fluctuations of the tool at processing on multispindle machine tools for hard turning. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 61–65.
5. Pronin A.I., Shchelkunov E.B., Vinogradov S.V., Shchelkunova M.E., Mylnikov V.V. Investigation of cutting force in hardened steel turning. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 1, no. 4, pp. 63–66.
6. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Voropaev V.V., Petunin A.A. Study of hard turning of deposited surface with a tool with a closed system of heat removal from a replaceable insert. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Soloveva*, 2017, no. 2, pp. 169–174.



- Journal of Industrial Engineering Computations*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 347–362.
19. Kim D.M., Kim D.Y., Banerjee N., Park H.W. Predictive modeling for the cryogenic cooling condition of the hard turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. Article in press.
20. Ko T.J., Kim H.S. Surface Integrity and Machineability in Intermittent Hard Turning. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2001, vol. 18, no. 3, pp. 168–175.

### THE STUDY OF HARD TURNING OF 105WCr6 STEEL

© 2018

*D.A. Rastorguev*, PhD (Engineering),  
assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machinery Production”  
*A.A. Sevastyanov*, student of Institute of Mechanical Engineering  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** hard turning; 105WCr6 steel; chip formation; cutting modes; chip types; segmental chip; continuous chip; transition-type chip; surface quality; CNC machines.

**Abstract:** The paper presents the results of the experiment on the processing of 105WCr6 steel ring blanks prehardened up to the HRC 55 hardness. This material is applied to produce cutting and measuring tools with the high requirements for the accuracy in size and flatness after the thermal treatment. The experiment involved the ring facing using the 16B16T1C1 machine with the CBN plate cutter without the use of a lubricating and cooling fluid. The cutting rate and the advancement and depth of cutting were varied during the three-factor experiment. For the wider industrial application, hard turning requires the additional research related to the study of special aspects of chip formation, the identification of the dependencies of cutting forces and temperature in the cutting zone on the processing mode. The authors studied the chip formation process and the quality of processed surface and carried out the systematization of chip types depending on the cutting modes. The main technology factor determining a chip type is the cutting rate. When it increases the chip type changes from a continuous chip through a transition form to a segmental chip. When zooming in a chip, the well-defined chip segmentation can be seen. When increasing the cutting rate the segments become more defined that causes the change of a chip type. At the critical value of the cutting rate, the chip comes from a discontinuous one to a segmental chip. In this case, the dynamic component of cutting force related to the chip formation process grows. Such change in the cutting process dynamics is accompanied by the corresponding traces of a tool on a processed surface. Stable type of chip formation promotes the formation of a surface with the regular minimum height microrelief. The growth of chip formation dynamism, when increasing the cutting rate, causes the formation of a moire effect on a processed surface. The study identified the processing modes optimal in terms of efficiency, surface condition and chip type. The results obtained can be used to organize an automated manufacturing with the use of CNC machines and automatic lines.