

НАНОРЕЗАНИЕ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

С момента создания сверхтвердых режущих материалов проводятся исследования, направленные на достижение все более высоких результатов по шероховатости, точности формы и размеров при точении и фрезеровании твердых и труднообрабатываемых материалов.

В настоящее время ведущие мировые производители прецизионного оборудования (SCHAUBLIN, HARDINGE, HEMBRUG и др.) предлагают станки для обработки режущими инструментами из кубического нитрида бора (CBN) деталей из твердых и труднообрабатываемых материалов с техническими требованиями:

- по шероховатости $Ra = 0,1-0,3$ мкм;
- по отклонению формы $0,3-0,5$ мкм;
- по отклонению размеров $0,5-1,5$ мкм.

Режущие инструменты из CBN, выпускаемые ведущими мировыми инструментальными фирмами (SANDVIK, MITSUBISHI, WALTER и др.), имеют остроту (радиус округления) режущей кромки порядка нескольких микрон. Поэтому при резании такими инструментами возникают значительные усилия, а, следовательно, и высокая температура в зоне резания (наблюдается свечение, и даже летят искры), которая способствует изменению структуры и химического состава поверхностного слоя обработанного таким способом изделия. Последнее приводит к тому, что снижаются эксплуатационные характеристики поверхностного слоя. Например, у беговых дорожек подшипников качения снижается микротвердость поверхностного слоя.

Поэтому, твердое резание хотя и может во многих случаях заменить шлифование, но для ответственных изделий обязательно требуется дополнительная доводочная обработка с целью устранения дефектного слоя, образованного в результате твердого резания.

Причем, при доводочных операциях, снимая дефектный слой, можно значительно улучшить параметр шероховатости, но в то же время ухудшить параметры отклонения формы и размера, а самое важное — при доводке обрабатываемая поверхность шаржируется абразивом, который также снижает эксплуатационные свойства обработанной поверхности.

У многих ультрапрецизионных изделий, изготавливаемых из твердых и труднообрабатываемых материалов (на-

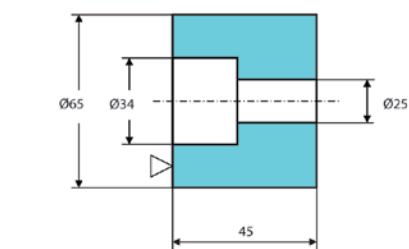
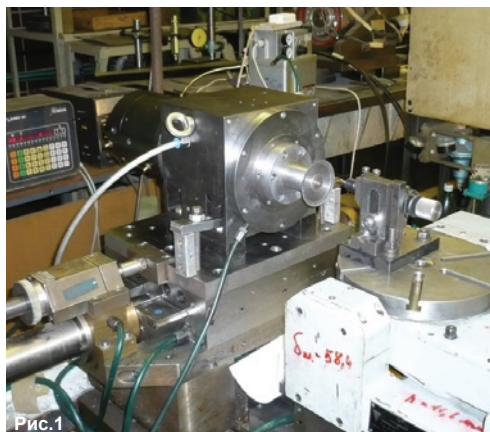


Рис. 2

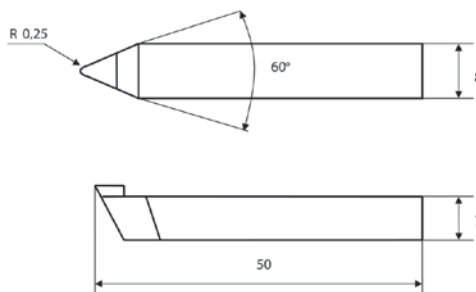


Рис. 3



Рис. 4



Рис. 5



Рис. 6

Установка для подготовки и подачи распыленного масла LMU100-50

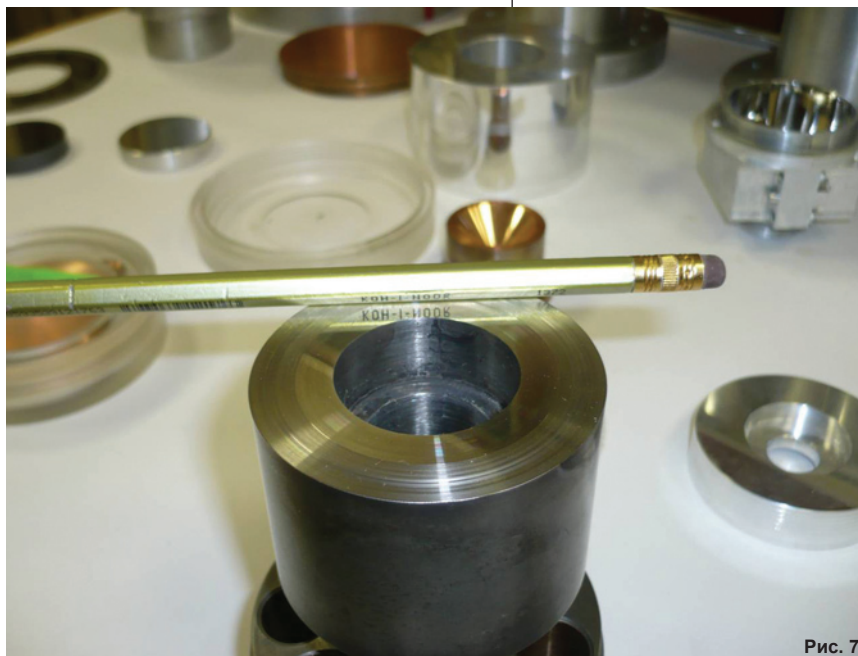


Рис. 7

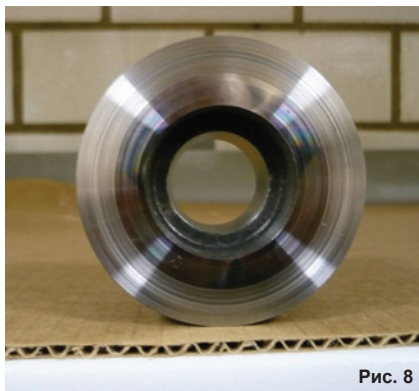


Рис. 8

- режущий инструмент с очень острой режущей кромкой, имеющей радиус округления менее 50 нм;
- ультрапрецизионный станок с уровнем относительных колебаний между режущей кромкой и обрабатываемой поверхностью менее 50 нм;
- специальная СОЖ в распыленном виде.

В качестве режущего инструмента использовался токарный резец, изготовленный на предприятии «Микротехника» из нанодисперсного (размеры частиц 10 —

режущую кромку с радиусом округления менее 50 нм, которая при удельном усилии резания 1 кгс/мм создает давление в зоне резания порядка 2000000 кг/кв.см.

В качестве ультрапрецизионного станка использовался ультрапрецизионный станок-стенд «СВЖ», созданный на ОАО «Красный Пролетарий», на котором алмазным точением обрабатывались изделия металлооптики из цветных металлов и их сплавов с шероховатостью Ra менее 5 нм.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ультрапрецизионный станок-стенд «СВЖ» (рис. 1) включает в себя следующие основные компоненты, позволяющие производить ультрапрецизионную обработку:

- шпиндельный узел с пористыми графитовыми аэростатическими опорами и встроенным бесконтактным синхронным электродвигателем в специальном безвибрационном исполнении;
- две взаимно перпендикулярные каретки на аэростатических щелевых опорах;
- бесконтактные приводы подачи кареток на базе бесконтактных пневмо-цилиндров и сверхвязкой демпфирующей жидкости;
- специальные микрометрические винты врезания в сочетании с оптическими линейками.

ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ ОБРАЗЕЦ

Цилиндрическая заготовка (рис. 2) диаметром 65 мм и длиной 45 мм.

Материал: сталь ШХ 15 ГОСТ 801-78.
Термообработка: объемная закалка.
Твердость: HRC 60.

РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Режущая часть резца (рис. 3, рис. 4) выполнена из нанодисперсного (размеры частиц 10–50 нанометров) поликристаллического особо чистого (99,5%) плотного нитрида бора DBN.

Передний угол: $\gamma = 0^\circ$, задний угол: $\alpha = 5^\circ$.

Окончательная доводка режущих кромок резца проводилась на станке-стенде «СВЖ» чугуном диском, шаржированным алмазной пастой с зернистостью 1–3 мкм и 0–1 мкм.

Рабочая поверхность чугунного диска была проточена на станке-стенде «СВЖ» резцом из CBN. Биение рабочей поверхности мене 1 мкм.

Контроль отсутствия сколов на режущей кромке резца осуществлялся на оптическом инструментальном микроскопе ИМЦ 100х50.А производства Ново-

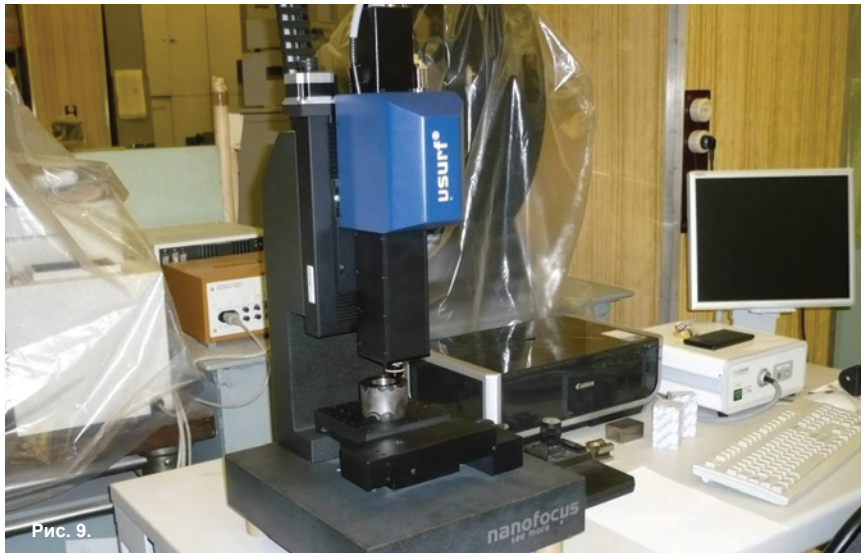


Рис. 9.

Конфокальный микроскоп модель μ Surf, фирмы NanoFocus AG, Германия

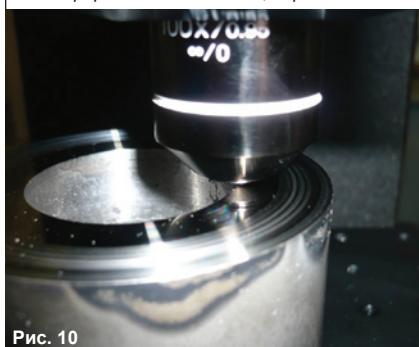


Рис. 10

пример, для деталей металлооптики, аэростатических опор, подшипников качения и скольжения), предъявляются более высокие технические требования:

по шероховатости Ra менее 0,01 мкм;
по отклонению формы менее 0,1 мкм;
по отклонению размера менее 0,2 мкм при отсутствии изменении структуры и химического состава поверхностного слоя, а также при отсутствии шаржирования поверхностного слоя абразивом.

Для решения этой задачи была произведена попытка осуществить обработку закаленной стали с шероховатостью Ra 0,01 мкм по технологии нанорезания, используя следующие компоненты:

50 нанометров) поликристаллического особо чистого (99,5%) плотного нитрида бора DBN (Dense Boron Nitride).

Плотный нитрид бора наряду с высокой теплостойкостью (1300°C), высоким модулем упругости (900 ГПа) обладает следующими прекрасными свойствами:

- микротвердостью (95-100 ГПа), примерно в 2 раза большей, чем у обычного нитрида бора (CBN);
 - рекордной теплопроводностью (400 Вт/м x град. Кельвина), превосходящей теплопроводность CBN примерно в 5 раз, а натурального алмаза (ND) — примерно в 2,5 раза.
- Стойкость инструмента из DBN в сравнении со стойкостью инструментов из CBN при обработке:
- закаленных сталей с HRC 70 и высокопрочных чугунов HB 600 выше в 3 — 7 раз;
 - твердых сплавов (WC+6%Co), керамики (HRA 91), карбида кремния (SiC) выше в 5 — 7,5 раза;
 - нитинола (50%Ni + 50%Ti) выше в 9 — 12 раз.

И самое важное то, что нанодисперсная структура DBN позволяет формировать у инструмента очень острую

сибирского приборостроительного завода (рис. 5) при увеличении 40 крат.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Глубина резания $t = 10$ мкм.

Частота вращения шпинделя $n = 500$ об/мин.

Минутная подача $s_m = 1,5$ мм/мин.

Оборотная подача $s_o = 3$ мкм/об.

Охлаждение и смазка в зоне резания: специальная СОЖ в распыленном виде (рис. 6).

Обрабатывался торец образца, обозначенный треугольником на рис. 2, в направлении подачи от оси вращения шпинделя.

Кольцевой участок обработанной поверхности шириной около 5 мм, расположенный ближе к оси вращения, обрабатывался с подачей специальной смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону резания, затем подача СОЖ была отключена и внешний кольцевой участок обрабатывался без подачи СОЖ.

При обработке с подачей СОЖ в зону резания процесс резания проходил без перегрева в зоне резания. Свечения и огненных искр не наблюдалось. В результате резания образовывалась светлая, витая, хрупкая стружка с блестящей поверхностью со стороны среза.

КОНТРОЛЬ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследовались два кольцевых участка на обработанной поверхности образца (рис. 7 и 8): зеркальный, расположенный ближе к оси образца, и матовый, расположенный на периферии. Измерения шероховатости и отклонения формы обработанной поверхности выполнялись в АНОН НИЦ «КП-Алмаз» на конфокальном микроскопе « μ Surf» производства фирмы «Nanofocus» (рис. 9 и 10).

Результаты измерений представлены на рис. 11–21.

На рис. 11 и 12 зафиксирован момент перехода от точения с подачей СОЖ к точению без СОЖ. Видно, как произошел отжим режущей кромки (примерно на 1,5 мкм) из-за резкого изменения усилий резания и высота неровностей обработанной поверхности увеличилась с десятих долей микрометра до микрометров.

На рис. 13 и 14 представлены топограмма и профиль поверхности зеркального участка в поперечном направлении. Наибольшее отклонение профиля составило 0,833 мкм на всей ширине участка 5,03 мм.

На рис. 15 и 16 представлены топограмма и профиль поверхности матового участка в поперечном направлении. Наибольшее отклонение профиля составило 12,103 мкм на всей ширине участка 8,18 мм.

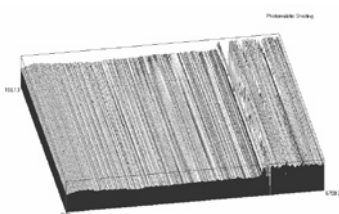


Рис. 11
Топограмма поверхности зеркального и части матового кольцевых участков (160 x 6760 мкм)

Profile description	Points/mm = 3200
Position = 0.029 mm	Minimum = 0.752 μ m
Profile no. = 91	Maximum = 5.334 μ m
Length = 6.900 mm	Range = 4.582 μ m
Points = 22080	Mean = 3.890 μ m

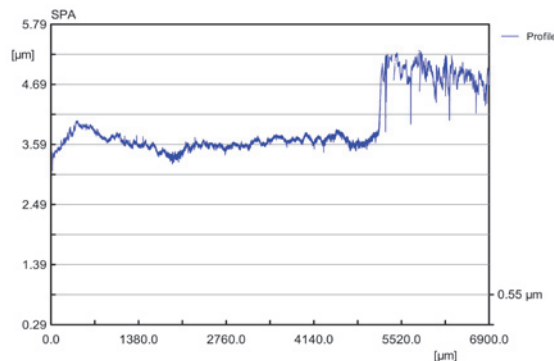


Рис. 12
Профиль поверхности зеркального и части матового кольцевых участков в поперечном направлении (160 x 6760 мкм)

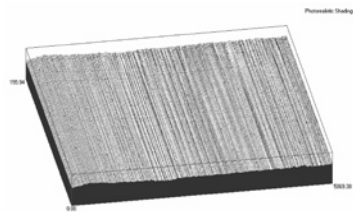


Рис. 13
Топограмма поверхности зеркального участка (160 x 5070 мкм)

Profile description	Points/mm = 3200
Position = 0.053 mm	Minimum = 3.206 μ m
Profile no. = 170	Maximum = 4.039 μ m
Length = 5.030 mm	Range = 0.833 μ m
Points = 16096	Mean = 3.641 μ m

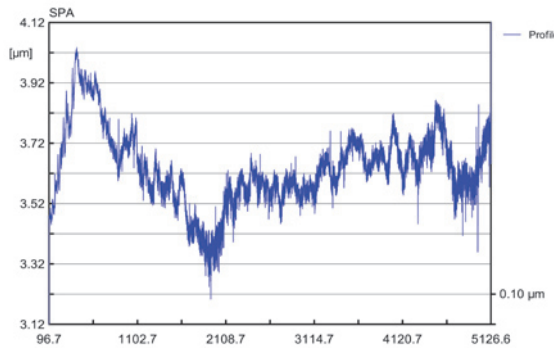


Рис. 14
Профиль поверхности зеркального кольцевого участка в поперечном направлении (160 x 5127 мкм)

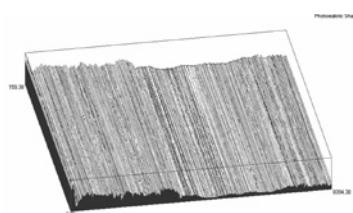


Рис. 15
Топограмма поверхности матового кольцевого участка (160 x 8400 мкм)

Profile description	Minimum = 9.705 μ m
Length = 8.180 mm	Maximum = 21.807 μ m
Points = 26176	Range = 12.102 μ m
Points/mm = 3200	Mean = 14.693 μ m

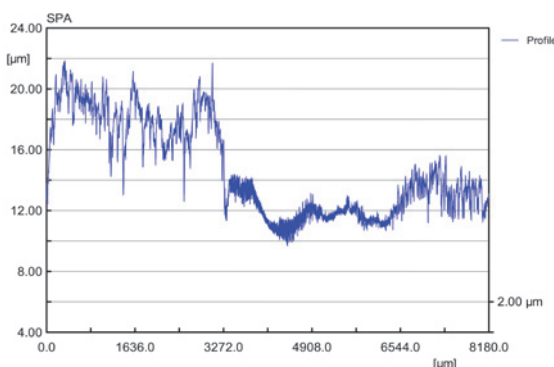


Рис. 16
Профиль поверхности матового кольцевого участка в поперечном направлении (160 x 8180 мкм)

На рис. 17, 18 и 19 представлены типичные топограмма и профили поверхности в середине зеркального участка в поперечном и продольном направлениях.

Шероховатость в поперечном направлении:

- Ra = 0,012 мкм,
- Rz = 0,106 мкм.

Шероховатость в продольном направлении:

- Ra = 0,007 мкм,
- Rz = 0,044 мкм.

На рис. 20 и 21 представлены типичные топограмма и профили поверхности в середине матового участка в поперечном направлении.

Шероховатость в поперечном направлении:

- Ra = 0,312 мкм;
- Rz = 1,778 мкм.

Из топограмм и профилей поверхности зеркального участка (рис. 13, 14, 17, 18 и 19) видно, что для достижения более высоких параметров по шероховатости и

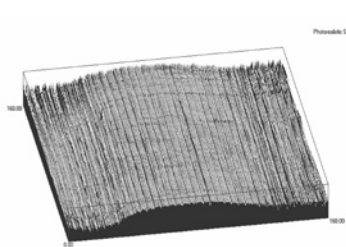


Рис. 17
Топограмма поверхности
в середине зеркального
кольцевого участка
(160 x 160 мкм)

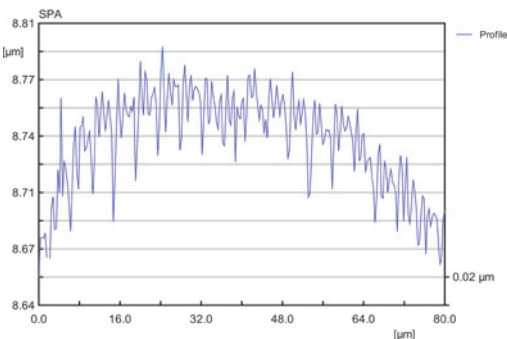


Рис. 18
Профиль поверхности в середине
зеркального участка в поперечном
направлении

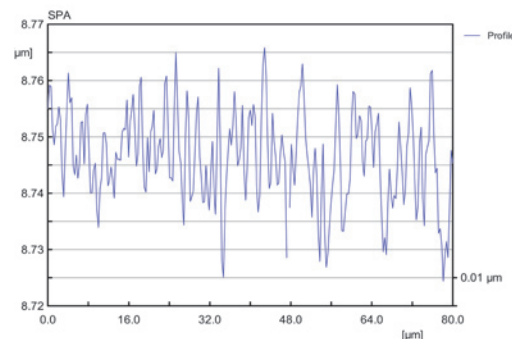


Рис. 19
Профиль поверхности в середине зеркального
участка в продольном направлении

Profile description	NeedleFilter = 0.000 mm
Length = 0.080 mm	No of Lr N = 1
Points = 256	Not conform with DIN EN ISO 4287
Points/mm = 3200	Conform with DIN EN ISO 4288
Minimum = 8.653 μm	Ra = 0.012 μm
Maximum = 8.792 μm	Rz = 0.106 μm
Range = 0.139 μm	Rt = 0.106 μm
Mean = 8.736 μm	Rq = 0.016 μm
Roughness parameters	Rmax = 0.106 μm
Filter = DIN EN ISO 11562	Rms S. = 00.056
LC (CutOff) = 0.080 mm	SEP 1940II(prEN 10049 C=0,5 μm)
Lr = 0.080 mm	Rpc = 0.000 1/cm

Profile description	NeedleFilter = 0.000 mm
Length = 0.080 mm	No of Lr N = 1
Points = 256	Not conform with DIN EN ISO 4287
Points/mm = 3200	Conform with DIN EN ISO 4288
Minimum = 8.723 μm	Ra = 0.007 μm
Maximum = 8.767 μm	Rz = 0.044 μm
Range = 0.044 μm	Rt = 0.044 μm
Mean = 8.746 μm	Rq = 0.009 μm
Roughness parameters	Rmax = 0.044 μm
Filter = DIN EN ISO 11562	Rms S. = 00.022
LC (CutOff) = 0.080 mm	SEP 1940II(prEN 10049 C=0,5 μm)
Lr = 0.080 mm	Rpc = 0.000 1/cm

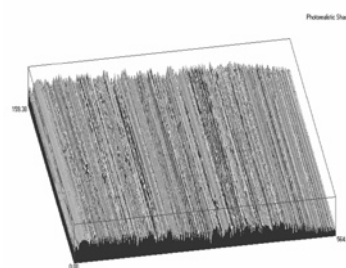


Рис. 20
Топограмма поверхности
в середине матового кольцевого
участка (160 x 560 мкм)

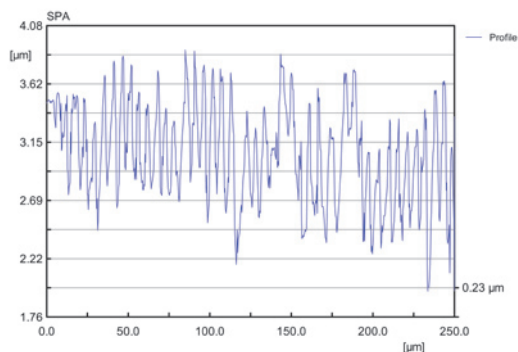


Рис. 21
Профиль поверхности в середине матового
участка в поперечном направлении

Profile description	No of Lr N = 1
Length = 0.250 mm	Not conform with DIN EN ISO 4287
Points = 800	Cutoff wave length not conform with
Points/mm = 3200	DIN EN ISO 4288
Minimum = 1.953 μm	Ra = 0.312 μm
Maximum = 3.891 μm	Rz = 1.778 μm
Range = 1.938 μm	Rt = 1.778 μm
Mean = 3.064 μm	Rq = 0.371 μm
Roughness parameters	Rmax = 1.778 μm
Filter = DIN EN ISO 11562	Rms S. = 00.529
LC (CutOff) = 0.250 mm	SEP 1940II(prEN 10049 C=0,5 μm)
Lr = 0.250 mm	Rpc = 360.451 1/cm
NeedleFilter = 0.000 mm	

отклонению формы обработанной поверхности при обработке закаленных сталей необходимо повысить жесткость системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь) станка-стенда «СВЖ» и предпринять другие меры для снижения уровня относительных колебаний между режущей кромкой инструмента и обрабатываемой поверхностью по шероховатости: в продольном направлении на частотах от 10 кГц до 1 МГц; в поперечном направлении на частотах от 1 Гц до 30 Гц; по отклонению формы в поперечном направлении на частотах менее 1 Гц.

Выводы

Практически, осуществлена токарная обработка нанорезанием закаленной стали твердостью HRC 60 резцом из нанодисперсного поликристаллического особо чистого плотного нитрида бора (DBN) с шероховатостью Ra = 0,012 мкм в поперечном направлении и с шероховатостью Ra = 0,007 мкм в продольном направлении.

Процесс резания проходил без перегрева в зоне резания и сопровождался образованием светлой, витой, хрупкой стружки с блестящей поверхностью со стороны среза.

Выявлено значительное влияние подачи специальной СОЖ в зону резания в распыленном виде на шероховатость обработанной поверхности. Шероховатость обработанной по-

верхности Ra = 0,312 мкм, полученная при обработке без СОЖ, снизилась до значения Ra = 0,012 мкм при обработке с подачей СОЖ, то есть в 26 раз.

Выявлены условия, необходимые для осуществления твердого нанорезания закаленной стали резцом из DBN с шероховатостью Ra менее 0,01 мкм:

- необходимо создать на резце режущую кромку с радиусом округления менее 50 нм без сколов;
- необходимо создать станок, обеспечивающий во время твердого нанорезания уровень относительных колебаний между режущей кромкой резца и обрабатываемой поверхностью менее 50 нм;
- осуществлять подачу специальной СОЖ в зону резания в распыленном виде.

Технология нанорезания закаленной стали реально осуществима и при дальнейшем развитии открывает широкие возможности для ультрапрецизионной обработки резанием изделий из твердых и труднообрабатываемых материалов

Г. В. Маринин, ООО «РУССКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

С. Н. Малышев, ООО «Предприятие «Микротехника»

Е. М. Захаревич, АНОН НИЦ «КП-Алмаз»