

УДК 621.941.1

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-76-85

Экспериментальные исследования по сверхточной лезвийной обработке кремния*

В.В. Лапшин¹, С.В. Грубый²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49

Experimental Studies of Ultra-Precision Cutting Edge Machining of Silicon

V.V. Lapshin¹, S.V. Grubyi²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Russian Research & Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT, 107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49



e-mail: vasylap@mail.ru, grusv@yandex.ru



В современной оптической промышленности широкое распространение находят оптические детали, изготовленные из монокристаллического кремния. К ним предъявляются высокие требования по точности и качеству обработки. Кремний относится к труднообрабатываемым хрупким материалам, однако при определенных условиях его можно обработать в режиме пластичного резания. В качестве режущего инструмента используют резцы с режущей частью из монокристаллического алмаза. Проведены литературный обзор по способам достижения режимов пластичной обработки кремния, а также анализ данных по износостойкости алмазных резцов. По результатам аналитического обзора поставлена задача экспериментального определения режимов лезвийной обработки монокристаллического кремния, а также исследования износа и стойкости алмазных резцов. Проведенные эксперименты показали возможность пластичной обработки кремния. Получены данные о стойкости алмазных лезвийных инструментов с заданной геометрией режущей части при различных условиях обработки.

Ключевые слова: сверхточная лезвийная обработка, алмазное точение, алмазный монокристаллический резец, монокристаллический кремний.



Parts made from monocrystalline silicon are widely used in modern optical industry. These must meet high standards of precision and machining quality. Silicon belongs to the category of hard-to-machine brittle materials; however, under certain conditions, the material can be processed in ductile cutting mode. Cutters with monocrystalline cutting heads are used for machining. A literature review of ductile cutting methods and a data analysis of wear resistance of diamond cutters were performed. Based on the analytical review, a problem was formulated on the experimental determination of monocrystalline silicon cutting modes and the study of wear and durability of diamond cutters. The conducted experiments have shown the possibility of ductile machining of silicon. The data

* Работа выполнена в рамках Соглашения от 25.08.2014 № 14.579.21.0042 (уникальный идентификатор RFMEFI57914X0042) между ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и Министерством образования и науки РФ по теме «Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания».

on wear resistance of diamond cutters with different geometry of the cutting head under different machining conditions was obtained.

Keywords: ultra-precision cutting edge machining, single-point diamond turning, monocrystalline diamond cutter, monocrystalline silicon.

Монокристалл кремния широко применяют для производства оптических, микроэлектронных и микромеханических компонентов. Кремний является распространенным материалом для изготовления оптических деталей, работающих в инфракрасном диапазоне спектра, так как обладает относительно малой плотностью, что позволяет снизить вес крупногабаритных элементов. В частности, из монокристаллического кремния оптического качества изготавливают плоскопараллельные пластины в оптическом диапазоне 3...5 мкм, а также подложки для интерференционных ИК-фильтров.

Вследствие высокого поглощения на длине волны 9 мкм оптический кремний не применяют в CO₂-лазерах в качестве пропускающей оптики, но часто используют при производстве зеркал для мощных лазеров, линз и окон, работающих в диапазоне 1...7 мкм.

Пластины кремния также получили широкое распространение в высокотехнологичных отраслях индустрии. На их основе изготавливают интегральные микросхемы, транзисторы и дискретные полупроводниковые приборы, детекторы и сенсоры, микроэлектромеханические системы, оптоэлектронные компоненты и солнечные элементы.

К оптическим деталям, функционирующим в инфракрасном диапазоне, предъявляются высокие требования по точности и качеству рабочих поверхностей. Кремний, свойства которого приведены ниже, относится к труднообрабатываемым хрупким материалам, что значительно повышает стоимость и сложность обработки изделия.

Физико-механические свойства кремния с ориентацией {1 1 1}

Коэффициент Пуассона μ	0,24
Модуль упругости материала E , ГПа	143,4
Теплопроводность λ , кал/(см·с·град)	0,47
Температуропроводность ω , см ² /с	1,19
Твердость HV , ГПа	10

Чтобы достичь необходимой точности и качества поверхности с минимальным числом повреждений, следует выполнить лезвийную обработку с предельно малыми подачами

и глубиной резания, а также использовать сверхточное оборудование высокой жесткости.

Традиционными последовательными операциями чистовой обработки кремния являются шлифование, доводка и полирование. В результате проведенного литературного обзора выявлено, что алмазное точение и фрезерование также способны обеспечить высокую точность обработки. При этом качество поверхности, обработанной лезвийным алмазным инструментом, должно быть выше, чем у полированной [1–3].

При лезвийной обработке кремния происходит значительный износ алмазного резца и возникают относительно высокие силы резания, что является причиной ухудшения качества поверхности. Данной проблеме посвящено большое количество научных исследований, и во всех работах упоминается хрупкопластичный переход. Это явление, наблюдающееся при обработке кремния и других хрупких материалов, проявляется в том, что при определенных условиях их можно обрабатывать как пластичные [4–9].

В статье [5] приведены результаты исследования по износу алмазного резца, а также по условиям, при которых возможен пластичный режим обработки кремния. Эксперименты выполнены по токарной схеме с использованием алмазного резца, имевшего следующие параметры: фасеточный резец с режущей кромкой длиной 1,2...1,5 мм; радиус округления режущей кромки $\rho = 20...50$ нм; угол резца в плане $\phi = 135^\circ$; передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 6^\circ$. На станке резец устанавливали таким образом, чтобы действительный передний угол был отрицательным и составлял -20° . Экспериментальные исследования выполнены с постоянной подачей на оборот $S_{об} = 10$ мкм/об и глубиной резания $t = 1$ мкм или $t = 2$ мкм. Толщина срезаемого слоя a составляла 60,9 и 900 нм, она достигалась за счет разворота фасеточного резца на угол $0,52...5,16^\circ$ относительно поверхности. При обработке с $a = 90$ нм установлено, что после прохождения инструментом длины пути резания 5 км шероховатость поверхности увеличивается. Это свидетельствует о том, что алмазный резец имеет значительный

износ и наступил режим хрупкого разрушения материала. До этого момента резание выполнялось в пластичном режиме.

В работе [6], посвященной обработке кремния лезвийным алмазным инструментом, описаны стойкостные эксперименты с использованием различных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и при разных геометрических параметрах инструмента, а также при неодинаковых кристаллографических ориентациях алмаза, закрепленного в резце. В исследовании по определению влияния СОЖ на стойкость инструмента применялся алмазный резец с радиусом при вершине $r = 0,5$ мм и углами $\gamma = -25^\circ$, $\alpha = 10^\circ$. Эксперименты, выполненные при $t = 10$ мкм, $S_{об} = 1$ мкм/об, показали, что при использовании определенного вида СОЖ, стойкость рабочего инструмента можно увеличить в 3 раза: с 7 до 22 км по пути резания. При этом износ задней поверхности, измеренный на одном из резцов, составил 7 мкм.

В исследовании по определению влияния переднего угла на стойкость инструмента, проведенном при $t = 20$ мкм и $S_{об} = 0,2$ мкм/об, применялись алмазные резцы со следующими параметрами: $r = 0,5$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = -15, -25, -45^\circ$. Согласно полученным результатам, наибольшая стойкость, составившая 35 км по пути резания, наблюдалась у резца с передним углом $\gamma = -25^\circ$. У резца с углом $\gamma = -15^\circ$ она равнялась 24 км, а с углом $\gamma = -45^\circ$ — 20 км. Во всех случаях критерием стойкости являлся переход обработки из пластичного режима в хрупкий, что выражалось в появлении на обработанной поверхности следов хрупкого разрушения.

В статье [10] рассмотрено влияние кристаллографической ориентации алмаза на его износ при пластичной обработке кремния. В экспериментах, выполненных при $t = 1$ мкм и $S_{об} = 0,1$ мкм/об, использовались алмазные резцы со следующими параметрами: $r = 2$ мм, $\rho = 30...60$ нм, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 7^\circ$. При этом толщина срезаемого слоя $a = 3,1$ нм, что обеспечивает обработку в пластичном режиме. Результаты испытаний позволили определить стойкость резцов, составившую 8...10 км по пути резания, а также выявить влияние на нее кристаллографической ориентации алмаза, в зависимости от которой при одной и той же длине пути резания значение износа варьировалось в пределах 15...27 мкм.

В работе [4], посвященной определению максимальной толщины срезаемого слоя, при

которой наступает пластичный режим обработки кремния, установлено, что этот параметр не должен превышать $a = 110$ нм.

В ряде публикаций изучение обрабатываемости кремния проведено с использованием компьютерного моделирования. Так, в статье [11] исследовано влияние температуры и ориентации кристалла алмаза на его износ с помощью моделирования молекулярной динамики. По результатам молекулярно-динамического анализа были сделаны следующие выводы:

- необходимым условием перехода кремния в пластичное состояние является его фазовая трансформация, происходящая при высоком давлении. Если это условие выполняется, то можно проводить обработку кремния в пластичном режиме даже затупленным инструментом;

- температурный градиент между задней и передней поверхностью, являющийся причиной более высокого износа первой из них, может быть минимизирован использованием подходящего покрытия, например перфторированного полимера;

- уменьшение осевой силы при кубической ориентации алмазного инструмента по сравнению с додекаэдрической свидетельствует о том, что первый тип ориентации предпочтительнее второго, так как обеспечивает меньший износ инструмента.

Возможность обработки кремния в пластичном режиме изношенным инструментом исследована также в статье [12], где установлено, что изношенный инструмент производит более высокий уровень напряжений с увеличением глубины внедрения. Если напряжение достаточно высокое, то фазовая трансформация преобладает над хрупким разрушением. Показано, что пластичным режимом удаления материала управляют фазовые трансформации, вызванные гидростатическим давлением и напряжением сдвига, которые возникают при взаимодействии режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом, одновременно с перемещением дислокаций и активацией системы скольжения.

Таким образом, данные литературных источников свидетельствуют о возможности чистовой лезвийной обработки монокристаллического кремния алмазным резцом. Вместе с тем вопросы износа, стойкости инструмента и качества обработки изучены недостаточно полно.

Цель работы — экспериментальное определение режимов лезвийной обработки монокри-

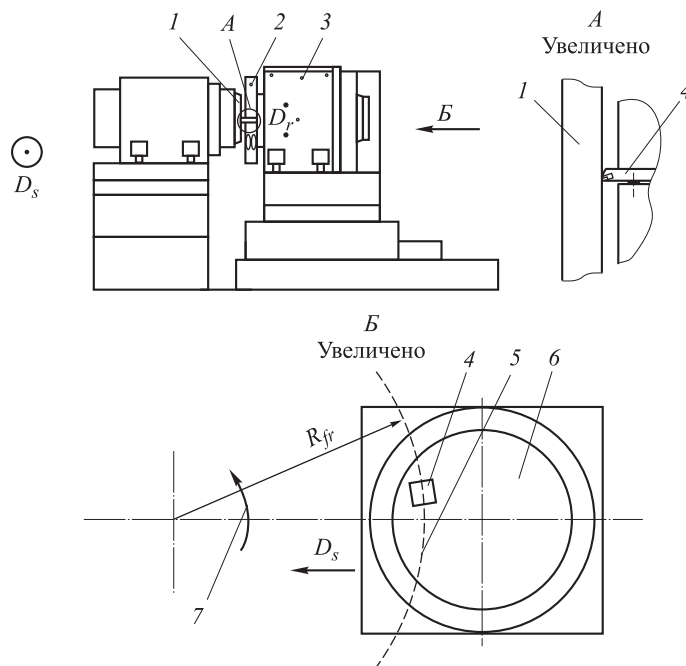


Рис. 1. Схема обработки заготовки из кремния:

1 — заготовка; 2 — однорезцовая фрезерная головка; 3 — аэростатический шпиндель; 4 — алмазный монокристаллический резец; 5 — траектория движения резца; 6 — обрабатываемая поверхность; 7 — направление вращения шпинделя; D_s — направление подачи детали; D_r — главное движение резания; R_{fr} — радиус однорезцовой фрезерной головки

сталлического кремния и исследование износа и стойкости алмазных резцов.

Исследование по определению стойкости и характера износа алмазного монокристаллического инструмента проводили на сверхточном обрабатывающем стенде, предназначенном для наноразмерной лезвийной и абразивной обработки материалов, в том числе неметаллических хрупких. Эксперименты по обработке заготовки из кремния выполняли по схеме фрезерования однорезцовой фрезерной головкой (рис. 1) [13, 14].

Согласно этой схеме, алмазный монокристаллический резец 4 устанавливали в однорезцовую фрезерную головку 2, закрепленную на аэростатическом шпинделе 3. Заготовку 1 размещали на шпинделе каретки продольной подачи. При обработке она не совершала вращательного движения, а перемещалась прямолинейно относительно фрезы в движении подачи. Заготовка имела диаметр 100 мм, что обеспечило большую длину пути резания, необходимую для проведения эксперимента.

В исследованиях использовали два алмазных резца с различной геометрией режущей части:

- радиус резца при вершине $r = 4,6$ мм, задний угол $\alpha = 7^\circ$, передний угол $\gamma = 0^\circ$;

- радиус резца при вершине $r = 3,7$ мм, задний угол $\alpha = 7^\circ$, передний угол $\gamma = -45^\circ$.

Перед проведением каждого эксперимента резец перетачивали, чтобы устранить следы износа, полученные при предыдущих испытаниях.

Режимные параметры, выбранные таким образом, чтобы обеспечить режим пластичной обработки кремния, приведены в табл. 1. При этих режимах выполнены три испытания по определению стойкости алмазного инструмента. На рис. 2 представлена фотография зоны обработки.

Критерием стойкости алмазного резца принято ухудшение качества полученной поверхности, что свидетельствует о переходе к хрупкому характеру обработки вследствие увеличения износа. Ухудшение качества поверхности,

Таблица 1

Режимные параметры обработки кремния алмазным резцом

Параметр	Значение
Радиус резца при вершине r , мм	4,6
Глубина резания t , мкм	5
Подача на оборот $S_{об}$, мкм/об	2,5
Толщина срезаемого слоя a , нм	111

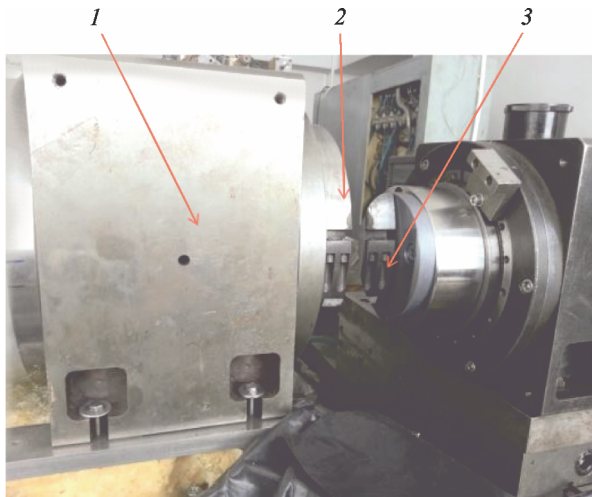


Рис. 2. Внешний вид зоны обработки:
1 — шпиндель; 2 — однорезцовая фрезерная головка;
3 — обрабатываемая заготовка

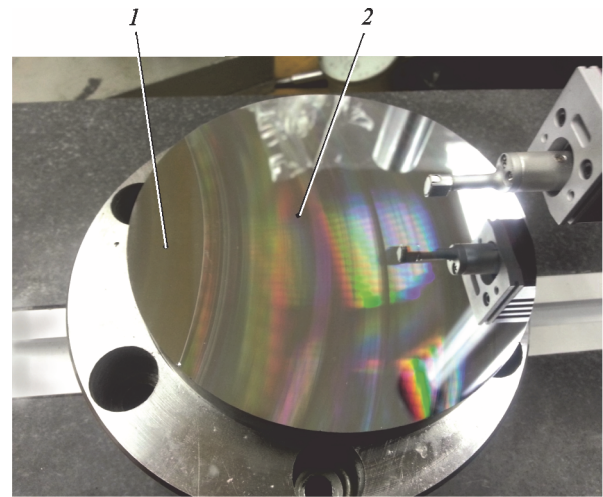


Рис. 3. Контроль с помощью профилометра шероховатости поверхности, обработанной неизношенным (1) и изношенным (2) резцами

наблюдаемое визуально, выразилось в появлении на ней «интерференционной картины» (радужной окраски поверхности).

На рис. 3 показана процедура контроля шероховатости поверхности, обработанной неизношенным и изношенным резцом. Шероховатость небольшого участка поверхности, обработанного с помощью неизношенного резца, была принята в качестве эталона сравнения. Как вид-

но из рис. 3, поверхность, обработанная изношенным резцом, имеет худшее качество, так как на ней наблюдается «интерференция».

Профилограмма эталонной поверхности, имевшей шероховатость $Ra = 0,008$ мкм и $Rz = 0,05$ мкм, показана на рис. 4, а, где l — перемещение. Шероховатость поверхности, обработанной изношенным резцом, варьировала на разных участках в диапазонах $Ra = 0,01 \dots 0,014$ мкм,

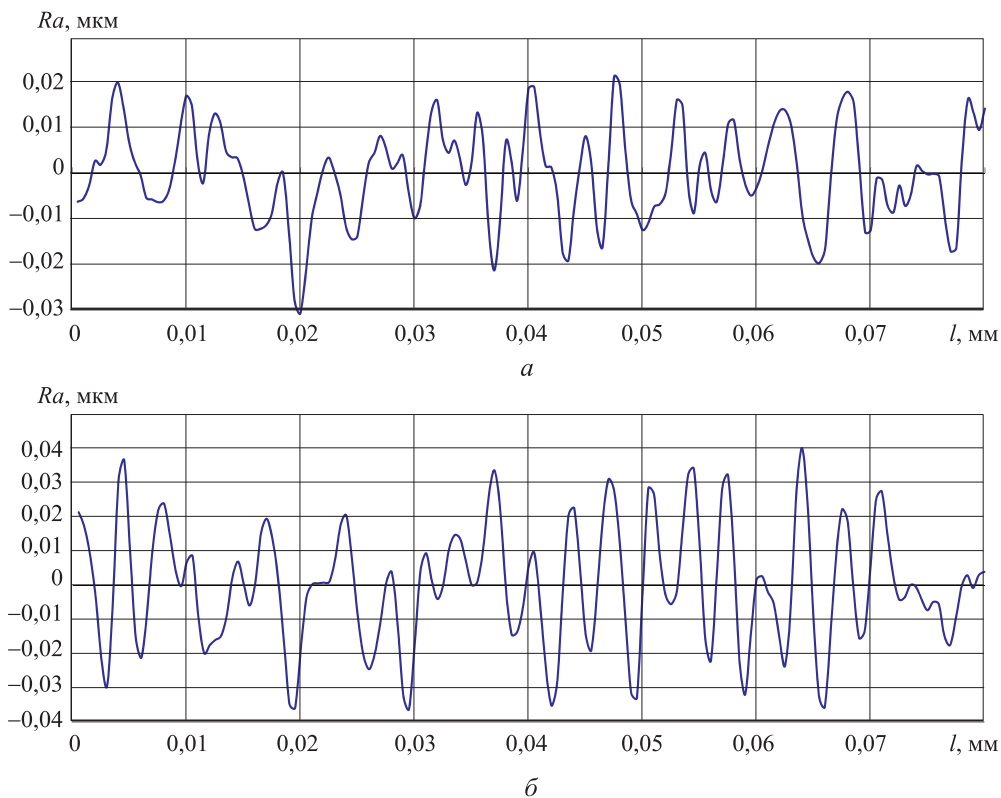
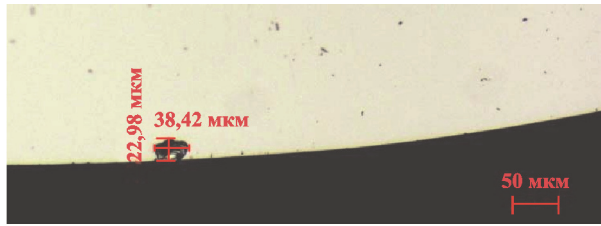


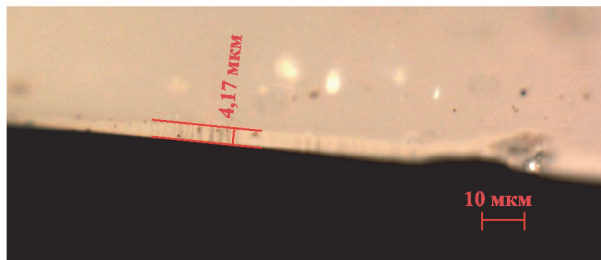
Рис. 4. Профилограммы поверхностей, обработанных неизношенным (а) и изношенным (б) резцом



a



б



в

Рис. 5. Распределение износа по передней (a) и задней поверхностям алмазного резца при меньшем (б) и большем (в) увеличении, полученное в первом испытании

$Rz = 0,058...0,077$ мкм. Профилограмма одного из участков приведена на рис. 4, б.

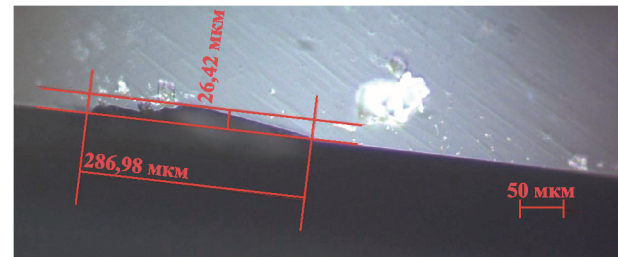
При первом испытании резца было сделано пять проходов по кремниевой заготовке до ухудшения качества ее поверхности. Путь резания алмазного инструмента составил 16 км. Метрологический контроль алмазного резца выявил на его передней поверхности небольшой скол (рис. 5, a), а на задней — узкую блестящую полоску шириной $b = 312,66$ мкм (рис. 5, б). При этом максимальное значение износа по задней поверхности h_z составило 4,17 мкм (рис. 5, в), радиальный износ h_r — 0,9 мкм, ширина лунки износа a_n — 22,98 мкм.

При втором испытании резца его стойкость составила 6,5 км по пути резания. Уменьшение этого параметра связано с образованием скола на передней поверхности инструмента, что привело к резкому ухудшению ее качества. Результаты метрологического контроля алмазного резца приведены на рис. 6, где видно, что ширина его изношенной задней поверхности

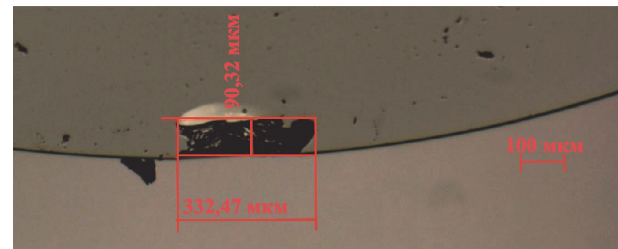
$b = 286,98$ мкм, а ширина лунки износа $a_n = 90,32$ мкм.

При третьем испытании инструмента его стойкость составила 7 км. Результаты метрологического контроля резца приведены на рис. 7, где видно, что ширина его изношенной задней поверхности $b = 233,66$ мкм, а износ по задней поверхности $h_z = 2,64$ мкм. При этом радиальный износ $h_r = 0,56$ мкм.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что для обеспечения

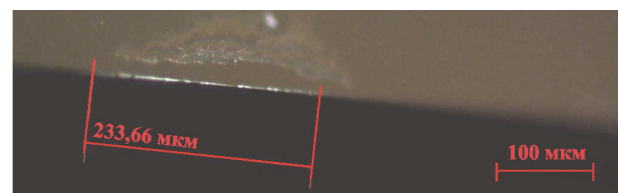


a

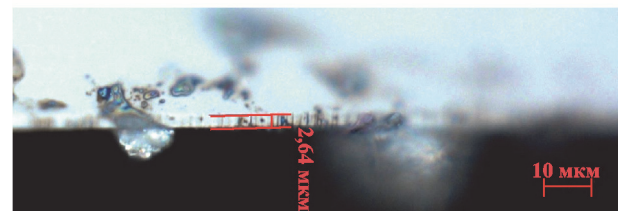


б

Рис. 6. Распределение износа по задней поверхности алмазного резца (a) и скол на его передней поверхности (б), полученные во втором испытании



a



б

Рис. 7. Распределение износа по задней поверхности алмазного резца при меньшем (a) и большем (б) увеличении, полученное в третьем испытании

Таблица 2

Режимные параметры при определении стойкости алмазного резца по кремнию

Параметр	Значение
Радиус резца при вершине r , мм	3,7
Глубина резания t , мкм	5
Подача на оборот $S_{об}$, мкм/об	2
Толщина срезаемого слоя a , нм	103

гарантированной обработки кремния в пластичном режиме стойкость инструмента следует принимать не более 6 км по пути резания. При большем пути резания возможно образование сколов и резкое ухудшение качества обработанной поверхности.

Проведены также экспериментальные исследования по определению стойкости алмазного резца с передним углом $\gamma = -45^\circ$. Обработка заготовки была выполнена по той же схеме (см. рис. 1), что и в предыдущих опытах, но при других режимных параметрах (табл. 2).

При четвертом испытании алмазного резца его стойкость составила 6,7 км по пути резания, ширина изношенной задней поверхности $b = 210$ мкм, а износ по задней поверхности $h_z = 4,42$ мкм. На основании результатов исследований сделан вывод о том, что наличие большого отрицательного переднего угла инструмента не оказывает существенного влияния на его стойкость.

Эксперименты по изучению влияния СОЖ на стойкость инструмента проводили также при режимных параметрах обработки кремния, приведенных в табл. 1. В качестве СОЖ исполь-

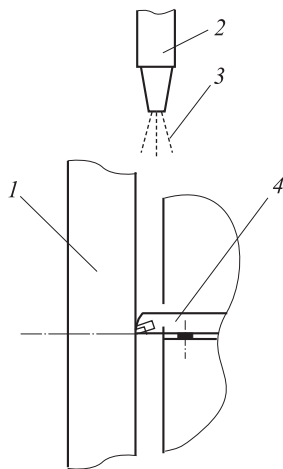


Рис. 8. Схема обработки с подачей СОЖ в зону резания:

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — сопло;
3 — распыленная СОЖ; 4 — алмазный резец

зовали изопарафин. Схема подачи СОЖ в зону резания показана на рис. 8.

При пятом испытании резца было выполнено три прохода до ухудшения качества его поверхности. Суммарный путь резания алмазного инструмента составил 9,72 км. При этом зафиксирован его износ по задней поверхности $h_z = 5,234$ (рис. 9) и радиальный износ $h_r = 1,112$. Ширина его изношенной задней поверхности $b = 158,45$ мкм. Сколов на резце не обнаружено.

Использование СОЖ при резании кремния приводит к оседанию смеси стружки и жидкости на обрабатываемой поверхности. Это связано с тем, что стружка, имеющая малые размеры, прилипает к поверхности, смоченной СОЖ. После каждого прохода алмазного инструмента необходимо тщательно очищать поверхность, что затрудняет оценку качества обработки. На рис. 10 представлена поверхность кремния с остатками СОЖ и стружки.

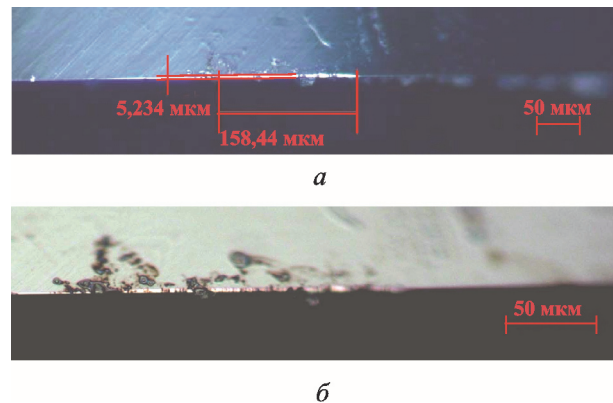


Рис. 9. Распределение износа по задней поверхности алмазного резца при меньшем (а) и большем (б) увеличении, полученное в пятом испытании



Рис. 10. Обработанная поверхность кремния с остатками СОЖ и стружки

Таблица 3

Обобщенные результаты экспериментов

Условия обработки	Стойкость инструмента L , км	Износ по задней поверхности h_z , мкм	Особенности
Табл. 1	16	4,17	Небольшой скол на режущей кромке
То же	6,5	—	Скол на режущей кромке
То же	7	2,64	Узкая и широкая ленточки износа
Табл. 2	6,7	4,42	—
Табл. 1	9,72	5,23	Узкая и широкая ленточки износа

Исследования показали, что СОЖ можно использовать для повышения стойкости рабочего инструмента. При этом необходимо предусмотреть такую операцию очистки обработанной поверхности от следов стружки и СОЖ, которая ее не повредит.

Обобщенные результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Выводы

1. Подтверждена возможность обработки монокристаллического кремния в пластичном режиме с толщиной срезаемого слоя 110 нм.

2. Достигнуто оптическое качество поверхности.

3. Выявлено положительное влияние СОЖ (изопарафина) на стойкость рабочего инструмента и качество обработки.

4. Эксперименты с увеличением значения отрицательного переднего угла не выявили повышения стойкости.

5. Установлено предельное значение износа алмазного монокристаллического резца, которое можно принять за критерий стойкости инструмента.

Литература

- [1] Saurav Goel, Xichun Luo, Paul Comley. Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 65, no. 2, pp. 15–21.
- [2] Saurav Goel, Xichun Luo, Anupam Agrawal. Diamond machining of silicon: A review of advances in molecular dynamics simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 131–164.
- [3] Hossein Mohammadi, H. Bogac Poyraz, Deepak Ravindra. Single point diamond turning of silicon by using micro-laser machining technique. *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference*, 2014, vol. 2, no. 6, 8 p.
- [4] Brian P. O'Connor, Robert D. Grejda, Byron R. Knapp. *Single-point diamond machining of silicon*. Machine Dynamics Research Laboratory, The Pennsylvania State University, 2000. p. 4.
- [5] Jiwang Yan, Katsuo Syoji, Jun'ichi Tamaki. Some observations on the wear of diamond tools in ultra-precision cutting of single-crystal silicon. *Wear*, 2003, vol. 255, pp. 1380–1387.
- [6] Durazo-Cardenas I., Shore P., Luo X. 3D characterisation of tool wear whilst diamond turning silicon. *Wear*, 2007, vol. 262, pp. 340–349.
- [7] Blake P.N., Scattergood R.O., Ductile-regime machining of Ge and Si. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 4, pp. 949–957.
- [8] Blackley W.S., Sacttergood R.O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials, *Precision Engineering*, 1991, vol. 13, no. 2, pp. 95–103.
- [9] Blackley W.S., Sacttergood R.O. Crystal orientation dependence of machining damage-stress model. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 10, pp. 3113–3115.

- [10] Sharif Uddin M., Seah K.H.W., Li X.P. Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon. *Wear*, 2004, vol. 257, pp. 751–759.
- [11] Saurav Goel, Xichun Luo, Robert L. Reuben. Influence of temperature and crystal orientation on tool wear during single point diamond turning of silicon. *Wear*, 2012, vol. 284–285, pp. 65–72.
- [12] Renato G. Jasinevicius, Jaime G. Duduch. Investigation on diamond turning of silicon crystal — generation mechanism of surface cut with worn tool. *Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2001, vol. 23, no. 2, pp. 241–252.
- [13] Грубый С.В., Лапшин В.В. Моделирование процесса и разработка технологии сверхточной обработки плоских отражателей однорезцовой алмазной фрезерной головкой. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/699743.html>.
- [14] Лапшин В.В., Грубый С.В. Повышение точности и качества алмазной лезвийной обработки плоских поверхностей. *Вестник машиностроения*, 2015, № 5, с. 57–62.

References

- [1] Goel S., Luo X., Comley P., Reuben R.L., Cox A. Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 65, pp. 15–21.
- [2] Goel S., Luo X., Agrawal A., Reuben R.L. Diamond machining of silicon: A review of advances in molecular dynamics simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, vol. 88, pp. 131–164.
- [3] Mohammadi H., Poyraz H.B., Ravindra D., Patten J.A. Single point diamond turning of silicon by using micro-laser machining technique. *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference*, 2014, vol. 2, article no. V002T02A057.
- [4] Brian P. O'Connor, Robert D. Grejda, Byron R. Knapp. *Single-point diamond machining of silicon*. Machine Dynamics Research Laboratory, The Pennsylvania State University, 2000. p. 4.
- [5] Yan J., Syoji K., Tamaki J. Some observations on the wear of diamond tools in ultra-precision cutting of single-crystal silicon. *Wear*, 2003, vol. 255, is. 7–12, pp. 1380–1387.
- [6] Durazo-Cardenas I., Shore P., Luo X., Jacklin T., Impey S.A., Cox A. 3D characterisation of tool wear whilst diamond turning silicon. *Wear*, 2007, vol. 262, is. 3–4, pp. 340–349.
- [7] Blake P.N., Scattergood R.O. Ductile-Regime Machining of Germanium and Silicon. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, is. 4, pp. 949–957.
- [8] Blackley W.S., Scattergood R.O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precision Engineering*, 1991, vol. 13, no. 2, pp. 95–103.
- [9] Blackley W.S., Scattergood R.O. Crystal orientation dependence of machining damage-stress model. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 10, pp. 3113–3115.
- [10] Uddin M.S., Seah K.H.W., Li X.P., Rahman M., Liy K. Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for Nano-scale ductile cutting of silicon. *Wear*, 2004, vol. 257, is. 7–8, pp. 751–759.
- [11] Goel S., Luo X., Reuben R.L., Pen H. Influence of temperature and crystal orientation on tool wear during single point diamond turning of silicon. *Wear*, 2012, vol. 284–285, pp. 65–72.
- [12] Jasinevicius R.G., Duduch J.G., Porto A.J.V. Investigation on diamond turning of silicon crystal — generation mechanism of surface cut with worn tool. *Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2001, vol. 23, no. 2, pp. 241–252.
- [13] Grubyi S.V., Lapshin V.V. Modelirovanie protsessy i razrabotka tekhnologii sverkhtochnoi obrabotki ploskikh otrazhatelei odnoreztsvoivoi almaznoi frezernoi golovkoi [Process modeling and ultra-precision machining technology development for flat reflectors using a diamond milling head]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of

Bauman MSTU]. 2014, no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/699743.html> (accessed 10 January 2017).

- [14] Lapshin V.V., Grubyi S.V. Povyshenie tochnosti i kachestva almaznoi lezviinoi obrabotki ploskikh poverkhnostei [Improving the accuracy and quality of the diamond blade processing of flat surfaces]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian engineering research]. 2015, no. 5, pp. 57–62.

Статья поступила в редакцию 23.01.2017

Информация об авторах

ЛАПШИН Василий Владимирович (Москва) — инженер-технолог ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: vasylap@mail.ru).

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

Information about the authors

LAPSHIN Vasily Vladimirovich (Moscow) — Process Engineer. Russian Research & Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49, e-mail: vasylap@mail.ru).

GRUBYI Sergei Vitalievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor. Department of Instrumental Equipment and Technology. Bauman Moscow State University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv@yandex.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 3-е издание учебника
под общей редакцией **А.Ю. Вараксина**

«Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок»

Рассмотрена термодинамическая эффективность газотурбинных и комбинированных установок. Изложены основы проектирования стационарных, транспортных газотурбинных и комбинированных установок, газотурбинных установок на нетрадиционных источниках энергии (солнечных, ветровых). Даны примеры проектирования основных элементов авиационных газотурбинных двигателей. Рассмотрены современные тенденции развития стационарных и транспортных газотурбинных установок и газотурбинных двигателей, сформулированы технико-экономические требования, необходимые при проектировании установок различных типов.

В третьем издании (1-е — 1977 г., второе — 2000 г.) значительно расширен раздел по парогазовым установкам и установкам с возобновляемыми источниками энергии, добавлен материал по теории и проектированию авиационных двигателей и их применению в энергетических и транспортных установках, а также использованию в газотурбинных установках вторичных энергоресурсов. Сокращен материал по комбинированным установкам с магнито-гидродинамическими генераторами и уменьшен объем материала по установкам периодического сгорания.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru