

УДК 539.3

Д.Е. МАРМЫШ, канд. физ.-мат. наук
доцент кафедры теоретической и прикладной механики¹
E-mail: marmyshde@bsu.by

В.Л. БАСИНЮК, д-р техн. наук, проф.
начальник НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» – заведующий лабораторией
приводных систем и технологического оборудования²
E-mail: vladbas@mail.ru

И.Д. ТЫЧИНСКАЯ
научный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования НТЦ «Технологии
машиностроения и технологическое оборудование»²
E-mail: ira.tychinski@gmail.com

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23.01.2026.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ КРЕМНИЯ ПРИ ЕЕ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкой кремниевой пластины при ее лезвийной обработке резцом из кубического нитрида бора. Сформулирована математическая модель НДС системы, а также модель контактного взаимодействия между пластиной и резцом. Решение механико-математической модели проводится с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench. Проведен анализ распределения полей напряжений в области контактного взаимодействия для различных величин срезаемого припуска пластины. Установлены закономерности, связывающие величину припуска с возникающими при обработке нормальными напряжениями. Их анализ показал, что при уменьшении величин срезаемого припуска с 20 до 1,5 мкм нормальные напряжения также снижаются. Это может быть связано с тем, что при относительно малых глубинах резания угол наклона отрезка контактного взаимодействия между пластиной и резцом к оси x уменьшается и влияние на напряженное состояние напряжений σ_{xx} также уменьшается, а одновременно с этим возрастает влияние напряжений σ_{yy} . Представлены данные о проведении экспериментальной обработки трех образцов кремниевой пластины с заданными режимами резания. Численный разброс значений средней шероховатости Ra для всех образцов варьируется в диапазоне 0,25–0,55 мкм, образец с наибольшей величиной припуска имеет наибольшее численное значение по всем представленным характеристикам. Показаны логарифмическая шкала с наложением средних величин по характеристикам Ra , Rq , Rsk , Rku , математическая реконструкция 3D-рельефа по параметрам Rsk , Rku и отношение номинальной к полной площади.

Ключевые слова: кремниевая пластина, кубический нитрид бора, напряженно-деформированное состояние, НДС, лезвийная обработка, численное моделирование

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-2-75-71-79>

Введение. Лезвийная обработка твердых неметаллических материалов используется для формирования поверхностного слоя детали с заданными геометрическими характеристиками. Кремниевые пластины занимают особое место в таких высокотехнологичных отраслях, как микроэлектроника, благодаря полупроводниковым свойствам. Кроме того, это дешевый и доступный материал. Особую актуальность пластины, изготовленные из крем-

ния, приобрели в монолитных интегральных схемах для высокочастотных плат [1]. В связи с этим к самим кремниевым пластинам предъявляются высокие требования по точности изготовления и качеству поверхностного слоя. Основную роль в формировании поверхности играет их обработка.

Существуют различные способы обработки поверхности пластин из кремния. Они отличаются между собой способом энергетического

воздействия, определяющего физико-механические и электрохимические явления, лежащие в основе обеспечения заданных свойств поверхностного слоя [2].

В настоящее время к одному из наиболее исследуемых способов поверхностной обработки пластин, в том числе и кремниевых, можно отнести лезвийную обработку резцами, изготовленными из твердых материалов, преимущественно таких как алмаз [3, 4]. При этом формирование поверхности при лезвийной обработке неизбежно приводит к концентрации напряжений в области контакта между пластиной и резцом, деформациям, а также к разрушению поверхности в виде откалывания срезаемого слоя пластины. В случае неверно заданного режима обработки возникает высокая концентрация напряжений и деформаций при контактом взаимодействии резца с обрабатываемой пластиной. Это может приводить к необратимому разрушению как резца, так и самой кремниевой пластины. В связи с чем значительный научный и практический интерес представляют исследования НДС пластины при различных режимах ее взаимодействия с резцом при лезвийной обработке.

Компьютерное моделирование НДС в системе технологической подготовки производства служит инструментом оптимизации процесса обработки хрупких материалов, обеспечивая более эффективное проектирование и управление технологическими процессами на производстве.

Постановка задачи. На рисунке 1 изображена принципиальная схема модели контакта обрабатываемой пластины и резца. Пластина изготовлена из кремния, резец — из кубического нитрида бора.

В таблице 1 представлены физико-механические характеристики используемых материалов [5, 6, 13, 14]. Указанные в таблице характеристики для монокристаллического кремния, обладающего анизотропией, приведены в усредненном значении, так как высокая точность характеристик в соответствии с только одной кристаллической ориентацией кристалла не является критической. На рисунке 2 показана расчетная схема для механико-математического моделирования процесса лезвийной обработки кремниевой пластины. Обработка является динамическим процессом, при котором резец движется вдоль поверхности пластины с постоянной скоростью v . Однако в данной

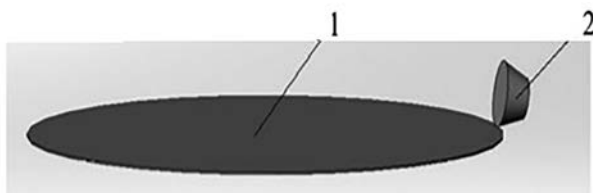


Рисунок 1 — Упрощенная схема лезвийной обработки пластины резцом: 1 — пластина; 2 — резец
Figure 1 — Simplified scheme of blade processing of the wafer with the cutter: 1 — wafer; 2 — cutter

Таблица 1 — Характеристики материалов резца и обрабатываемой пластины
Table 1 — Characteristics of the materials of the cutter and the processed wafer

Материал	Кубический нитрид бора	Кремний
Плотность ρ , кг/мм ³	$3,94 \cdot 10^{-6}$	$2,329 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга E , МПа	896 800	18 900
Коэффициент Пуассона ν	0,18	0,26
Объемный модуль упругости K , МПа	467 080	13 462
Модуль сдвига G , МПа	380 000	7464,5
Коэффициент теплового расширения α , 1/°C	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности на сжатие $\sigma_{\text{с}}$, МПа	1500	500

работе задача контактного взаимодействия между пластиной и резцом решалась в квазидинамической постановке, когда резцу задавалось горизонтальное перемещение вдоль оси x .

Как видно из рисунка 2, угол пластины 1 имеет скругление, сформированное на этапе разделения слитка кремния на подложки, радиус R которого ориентировочно равен 50 мкм. У резца 2 также имеется первоначальное скругление r , величина которого в расчетной модели была принята равной 10 мкм. Отметим, что в процессе обработки пластины вершина резца постепенно изнашивается и радиус ее скругления увеличивается. При этом, по мере снятия припуска, радиус R постепенно исчезает. Вместе с тем в начальный момент, который наиболее опасен в части разрушения обрабатываемой пластины, силы резания направлены вглубь пластины. Поэтому исследовался только этот наиболее критический момент взаимодействия резца с пластиной.

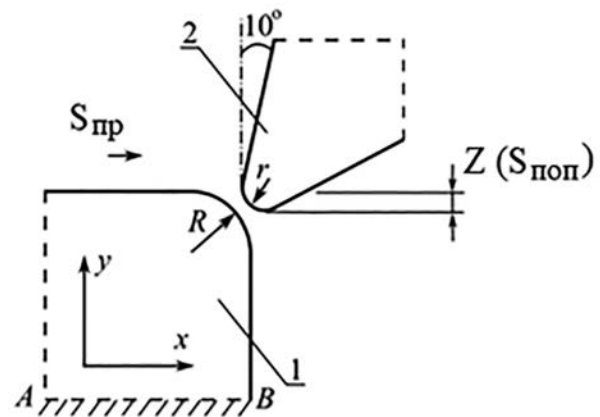


Рисунок 2 — Схема для построения механико-математической модели: 1 — пластина; 2 — резец; $Z(S_{\text{поп}})$ — припуск срезаемого материала за проход; R — скругление резца пластины; r — торцевое скругление пластины; AB — нижняя грань; $S_{\text{пр}}$ — продольная подача

Figure 2 — Scheme for constructing a mechanical and mathematical model: 1 — wafer; 2 — cutter; $Z(S_{\text{non}})$ — allowance of the cut material per pass; R — rounding of the cutter of the wafer; r — end rounding of the wafer; AB — lower face; $S_{\text{пр}}$ — longitudinal feed

На рисунке 3 представлены результаты замеров первоначального скругления r , имеющегося у каждого резца в партии из 7 замеренных резцов. Как видно, линейная величина неравномерного выкрашивания частиц резца, создающего отклонения окружности большего основания усеченного конуса, которое является режущей кромкой, может достигать 7,50–12,78 мкм (наибольшее замеренное 29,6 мкм). Во время обработки радиус закругления вершины резца в процессе износа увеличивается. Резец, с учетом его прочностных свойств и возможностей управления в определенном диапазоне величинами переднего и заднего углов, выполнен с углом резания 65° , причем его левая грань установлена с наклоном к вертикали под углом в 10° (см. рисунок 2), что предусмотрено конструктивными особенностями оснастки, на которой установлен резец из кубического нитрида бора.

Граничные условия в механико-математической модели приняты следующими:

- пластина 1 жестко закреплена по своей нижней грани AB ;

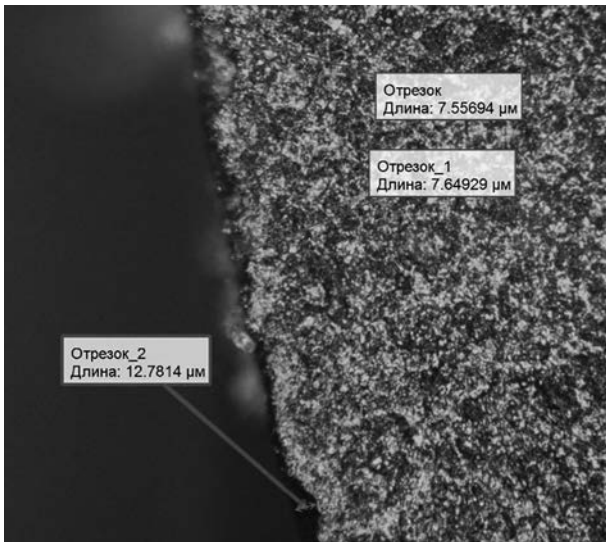
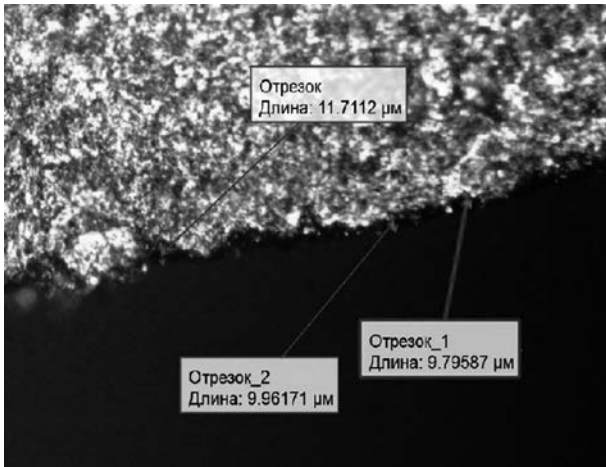


Рисунок 3 — Первоначальные дефекты окружности режущей поверхности резца
Figure 3 — Initial defects in the circumference of the cutting surface of the cutter

- резец 2 как твердое тело может перемещаться только вдоль горизонтальной оси x , перемещение вдоль вертикальной оси в процессе резания отсутствует;

- припуск снимаемого материала за проход представлен величиной $Z(S_{\text{non}})$, которая является переменной и исходно определяется оператором для заданного режима поверхностной обработки;

- коэффициент статического трения между поверхностями $\mu_s = 0,1$ [7].

Механико-математическая модель деформированных сред. Задача о напряженно-деформированном состоянии рассматривается в плоской постановке для плоского деформированного состояния, соответственно перемещения (u, v) среды являются функциями координат (x, y) и не зависят от z , т. е.

$$u^{(i)} = u^{(i)}(x, y); \quad v^{(i)} = v^{(i)}(x, y), \quad (1)$$

где $i = 1$ для пластины и $i = 2$ для резца.

Компоненты деформаций выразятся как

$$\varepsilon_{xx}^{(i)} = \frac{\partial u^{(i)}}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy}^{(i)} = \frac{\partial v^{(i)}}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy}^{(i)} = \frac{\partial u^{(i)}}{\partial y} + \frac{\partial v^{(i)}}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xz}^{(i)} = \varepsilon_{yz}^{(i)} = \varepsilon_{zz}^{(i)} = 0, \quad i = 1, 2.$$

В силу малости размеров как пластины, так и резца влияние объемных сил не учитывалось, вследствие чего уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(i)}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(i)}}{\partial y} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Закон Гука для упругой деформации обоих тел:

$$\varepsilon_{xx}^{(i)} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \left(\sigma_{xx}^{(i)} - \frac{\nu_i}{1 - \nu_i} \sigma_{yy}^{(i)} \right);$$

$$\varepsilon_{yy}^{(i)} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \left(\sigma_{yy}^{(i)} - \frac{\nu_i}{1 - \nu_i} \sigma_{xx}^{(i)} \right); \quad (4)$$

$$\varepsilon_{xy}^{(i)} = \frac{2(1 + \nu_i)}{E_i} \sigma_{xy}^{(i)}, \quad i = 1, 2,$$

где E_i, ν_i — модуль Юнга и коэффициент Пуассона для кремния ($i = 1$) и кубического нитрида бора ($i = 2$) соответственно (см. таблицу 1).

Контактное взаимодействие между кремниевой пластиной и резцом является несогласованным. Первоначальный контакт в процессе врезки резца в пластину осуществляется в точке (герцевский контакт). Если разместить систему координат в центре отрезка $[-a; a]$ контакта между двумя телами, тогда интегральное уравнение контактного взаимодействия с учетом трения запишется в виде [8, 9]:

$$\int_{-a}^a \ln \frac{1}{|\xi - s|} p(\xi) d\xi + \pi e q(s) = \frac{f_2(s) - f_1(s) + \omega s}{\theta_1 + \theta_2}, \quad (5)$$

$$|s| \leq a,$$

где $\theta_i = \frac{2(1-\nu_i^2)}{\pi E_i}$, $i=1, 2$; $f_1(s), f_2(s)$ — уравнения кон-

тактирующих поверхностей для пластины и резца соответственно; ω — угол наклона оси резца к гори-

зонтальной оси x ; $\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{[(1-2\nu_1)/G_1] - [(1-2\nu_2)/G_2]}{[(1-\nu_1)/G_1] + [(1-\nu_2)/G_2]}$

мера различия постоянных упругости двух упру-

гих материалов; $G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$, ($i=1, 2$).

Распределенную силу трения $q(s)$ в выражении (5) определим по модели Кулона с коэффициентом трения μ , т. е. $q(s) = \mu_s p(s)$. Контактующие поверхности ограничены дугами окружностей с радиусами R и r для пластины и резца соответственно. Их аналитические выражения $f_1(s)$ и $f_2(s)$, как и угол наклона оси резца ω , будут зависеть от толщины срезаемого слоя δ (см. рисунок 2).

Система уравнений (1)–(4) вместе с граничными условиями формулирует механико-математическую модель рассматриваемой системы. Уравнение (5) определяет условия контактного взаимодействия между пластиной и резцом и решается относительно контактного давления $p(x)$, возникающего вдоль кривой взаимодействия.

Результаты численного моделирования. Численное моделирование напряженного состояния при лезвийной обработке пластины кремния проводилось методом конечных элементов с использованием модуля Static Structural программного комплекса ANSYS Workbench. На рисунке 4 *a* представлен общий вид конечно-элементной (КЭ) сетки для рассматриваемой системы. В силу того, что несогласованный контакт между пластиной и резцом происходит вдоль площадки с размерами значительно меньшими, чем геометрические размеры самих тел, то сетка имеет более мелкое разбиение вдоль кривых скругления (см. рисунок 4 *b*).

Кремний является хрупким материалом, поэтому в качестве критерия предельного состояния в области срезания слоя предлагается критерий максимальных касательных напряжений:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2},$$

где σ_1 и σ_3 — первые и третьи главные напряжения соответственно.

В качестве максимального значения касательного напряжения, при котором происходит разрушение кремния в виде скалывания, было взято значение 500 МПа [10–12]. На рисунке 5 показан график сеточной сходимости при расчете наибольшего значения максимального касательного напряжения в зависимости от размера элемента при детализации КЭ-сетки вдоль контактных поверхностей.

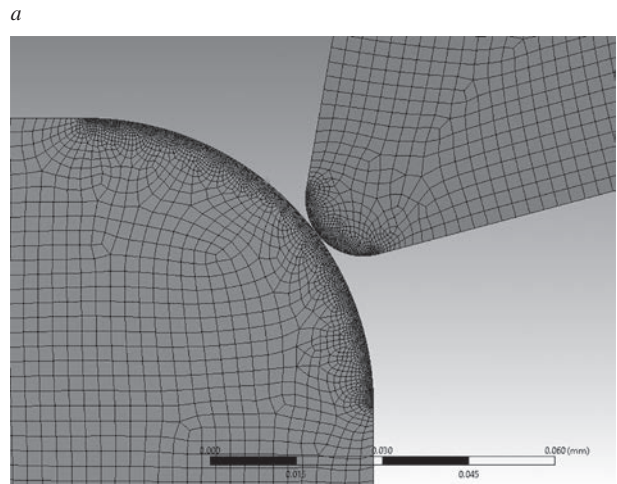
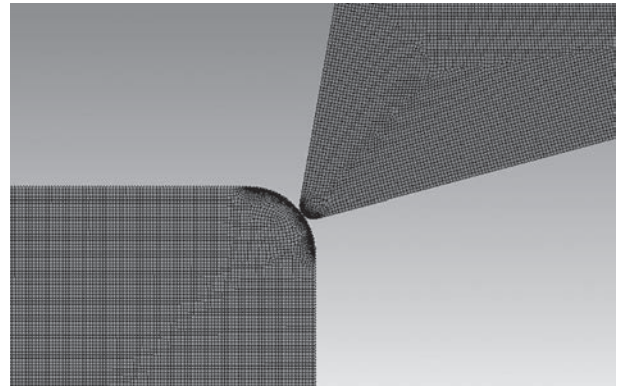


Рисунок 4 — Конечно-элементная сетка: *a* — общий вид; *b* — детализация в области контакта
Figure 4 — Finite element grid: *a* — general view; *b* — details in the contact area

Как видно из рисунка 5, при размере элемента 0,20–0,35 мкм значения отличаются несущественно. При размере элемента менее 0,20 мкм рассматриваемое значение напряжения увеличивается. В связи с этим был принят размер основного конечного элемента 2,50 мкм при дополнительном разбиении в области контактного взаимодействия с размером элемента 0,20 мкм. Отметим, что моделирование проводилось для различных величин припуска, снимаемого материала за проход $Z(S_{\text{пол}})$, при этом КЭ-разбиение не изменялось, оставаясь постоянным для разных значений $Z(S_{\text{пол}})$.

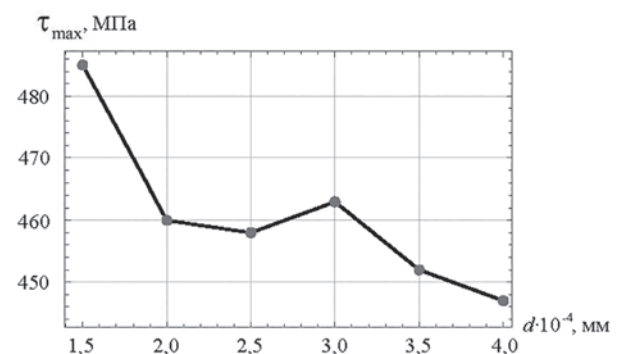


Рисунок 5 — Сеточная сходимость
Figure 5 — Grid convergence

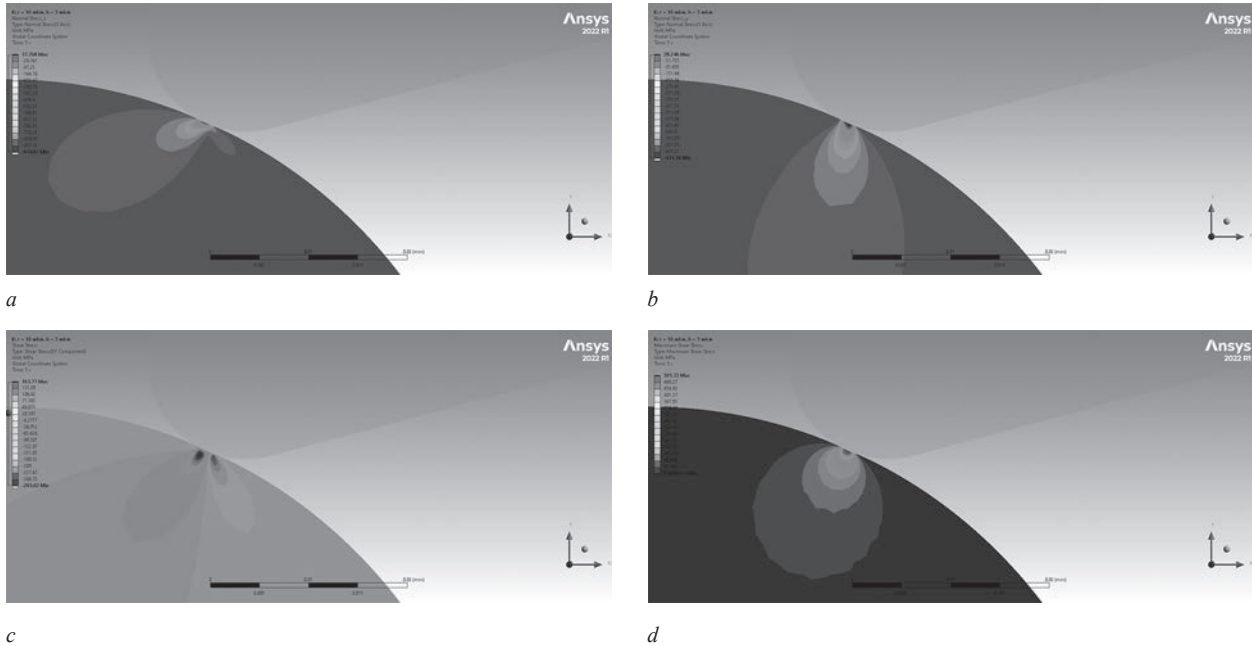


Рисунок 6 — Распределение напряжений в пластине в области контакта: *a* — нормальные σ_{xx} ; *b* — нормальные σ_{yy} ; *c* — касательные σ_{xy} ; *d* — максимальные касательные τ_{max}

Figure 6 — Stress distribution in the wafer in the contact area: *a* — normal σ_{xx} ; *b* — normal σ_{yy} ; *c* — tangents σ_{xy} ; *d* — maximum tangents τ_{max}

На рисунке 6 показаны поля распределения напряжений в кремниевой пластине в области контактного взаимодействия с резцом в режиме врезки последнего в пластину для толщины срезаемого материала $Z(S_{\text{поп}}) = 5$ мкм. Величина перемещения для резца вдоль оси x задавалась таким образом, чтобы максимальные касательные напряжения достигли величины 500 МПа.

Как уже было отмечено выше, численное моделирование напряженного состояния проводилось для разных толщин срезаемого слоя $Z(S_{\text{поп}})$ кремниевой пластины. В таблице 2 сведены агрегированные данные по максимальным значениям напряжений в пластине и величине полуоси a контактной площадки для фиксированных значений $Z(S_{\text{поп}})$. Для всех режимов обработки пластины максимальные касательные напряжения равны 500 МПа.

В таблице 2 эквивалентные напряжения (по Мизесу) σ_{eqv} рассчитывались по формуле:

$$\sigma_{\text{eqv}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения.

Таблица 2 — Характеристики напряженного состояния кремниевой пластины
Table 2 — Characteristics of the stress state of the silicon wafer

$Z(S_{\text{поп}})$, мкм	σ_{xx} , МПа	σ_{yy} , МПа	σ_{xy} , МПа	σ_{eqv} , МПа	a , мкм
20,0	-1044	-931	-304	991	3,30
10,0	-973	-848	-289	916	3,90
5,0	-973	-931	-295	957	2,10
2,0	-954	-945	-287	954	2,10
1,5	-781	-805	-233	796	1,60
1,0	-880	-896	-235	899	1,75

Исходя из данных таблицы 2, можно проследить некоторые закономерности изменения максимальных значений напряжений. Так, при уменьшении толщины срезаемого припуска $Z(S_{\text{поп}})$ абсолютная величина нормальных напряжений σ_{xx} устойчиво снижалась, а нормальные напряжения σ_{yy} в диапазоне реальных величин $\delta \approx 1 \dots 5$ мкм уменьшались. Это обусловлено тем, что для малых глубин резания угол наклона отрезка контактного взаимодействия между пластиной и резцом к оси x уменьшается и влияние на напряженное состояние напряжений σ_{xx} также уменьшается, а одновременно с этим возрастает влияние напряжений σ_{yy} .

Представленные данные о проведении экспериментальной обработки трех образцов кремниевой пластины № 3, 7, 13 с заданными режимами резания, указанными в таблице 3, показывают ту же закономерность, полученную в численной модели. Это подтверждает то, что и уменьшение величины припуска, срезаемого за проход в пределах 1–15 мкм, влияет на НДС кремниевой пластины во время ее механической обработки резанием.

По результатам обработки кремниевых пластин резанием на трех образцах толщиной 450–670 мкм (рисунок 7 *a–c*) при снятии материала с величиной припуска, срезаемого за проход, $Z(S_{\text{поп}}) = 1$ мкм (см. рисунок 7 *a, c*) был осуществлен сьем материала 18–22 мкм с сохранением целостности обрабатываемой кремниевой пластины. При припуске $Z(S_{\text{поп}}) = 15$ мкм (см. рисунок 7 *b*) за первый цикл пластина подверглась частичному разрушению.

В результате комплексного анализа характеристик поверхности обработанных образцов кремни-

Таблица 3 — Режимы обработки кремниевой пластины
Table 3 — Silicon wafer processing modes

Параметр	Образец № 3	Образец № 7	Образец № 13
Геометрические размеры до обработки, диаметр/толщина, мм	100/0,450	100/0,450	150/0,670
Геометрические размеры после обработки, диаметр/толщина, мм	100/0,432	Фрагменты/0,448	150/0,648
Частота вращения шпинделя, об/мин (rpm)	2000	2000	2000
Припуск, срезаемый за проход, $Z(S_{\text{поп}})$, мкм	1	15	1
Подача пластины в зону обработки, мм/с	0,5	1,0	1,0

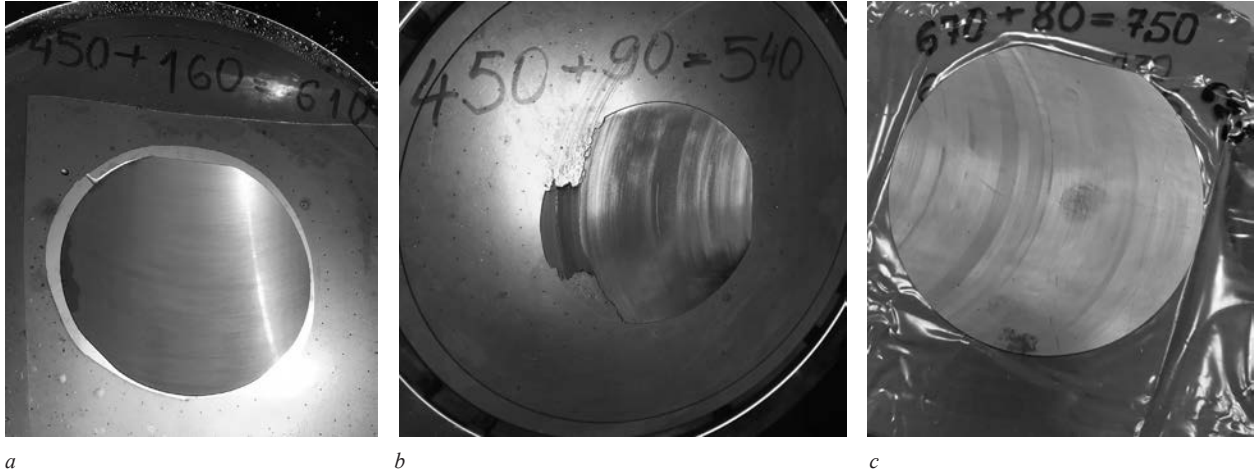


Рисунок 7 — Кремниевые пластины сразу после обработки резанием: *a* — образец № 3; *b* — образец № 7; *c* — образец № 13
Figure 7 — Silicon wafers immediately after cutting treatment: *a* — sample no. 3; *b* — sample no. 7; *c* — sample no. 13

евых пластин, представленных в таблице 4, была изучена полученная топография вновь образованных поверхностей кремниевых образцов № 3, 7, 13. Численный разброс значений средней шеро-

ховатости R_a для всех образцов варьируется в диапазоне 0,25–0,55 мкм, что в соответствии с ГОСТ Р 70117-2022 «Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору» в рамках технологии металлообработки относится к тонкому (0,050–0,400) и чистовому (0,40–1,60) шлифованию.

На рисунке 8 представлена логарифмическая шкала с наложением средних величин по характеристикам R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} . Каждый представленный параметр образца № 7, при обработке которого величина припуска, срезаемого за проход, $Z(S_{\text{поп}}) = 15$ мкм, незначительно, но превышает по всем характеристикам образцы № 3 и 13, для которых $Z(S_{\text{поп}}) = 1$ мкм. Также немаловажным является то, что образец № 7 (см. рисунок 7 *b*) во время обработки потерял целостность фактически в первом проходе, в отличие от образцов № 3 и 13 со снятием припуска в 18 и 22 мкм соответственно.

Таблица 4 — Характеристики поверхности обработанной пластины
Table 4 — Surface characteristics of the treated wafer

Параметр	Образец № 3	Образец № 7	Образец № 13
R_a (средняя шероховатость по площади $S = 432$ мкм ²), нм	422,3 543,0 427,8	649,0 500,2 495,3	562,3 349,4 461,9
R_a (средняя шероховатость по $L_{\text{баз}} = 29$ мкм), нм	279,7 268,7 297,0	189,0 334,0 620,0	422,0 284,0 321,0
R_a (средняя шероховатость по $L_{\text{баз}} = 4,8$ мм)	0,530 0,483	—	—
Соотношение номинальной к полной площади	0,770 0,795	0,840 0,816 0,798	0,774 0,700 0,810
R_q (среднеквадратичная шероховатость по площади $S = 432$ мкм ²), нм	499,2 684,0 503,4	769,9 597,6 602,5	672,9 430,8 518,5
R_{sk} (асимметрия профиля, 0 — симметрия)	0,046 -0,301 -0,016	-0,680 0,422 -0,709	-0,001 -0,174 -0,422
R_{ku} (куртозис профиля, <3 — более гладкая поверхность с плавными переходами)	2,523 1,998 2,202	2,301 2,244 2,340	2,129 2,635 2,013

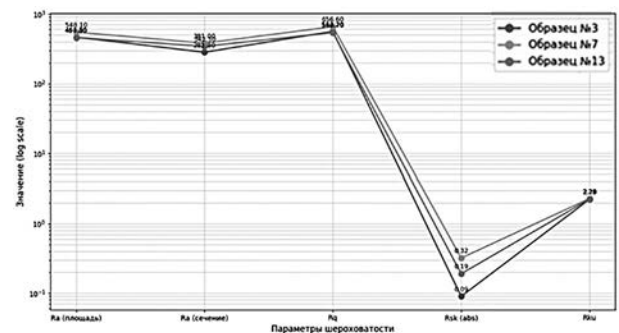


Рисунок 8 — Логарифмическая шкала
Figure 8 — Logarithmic scale

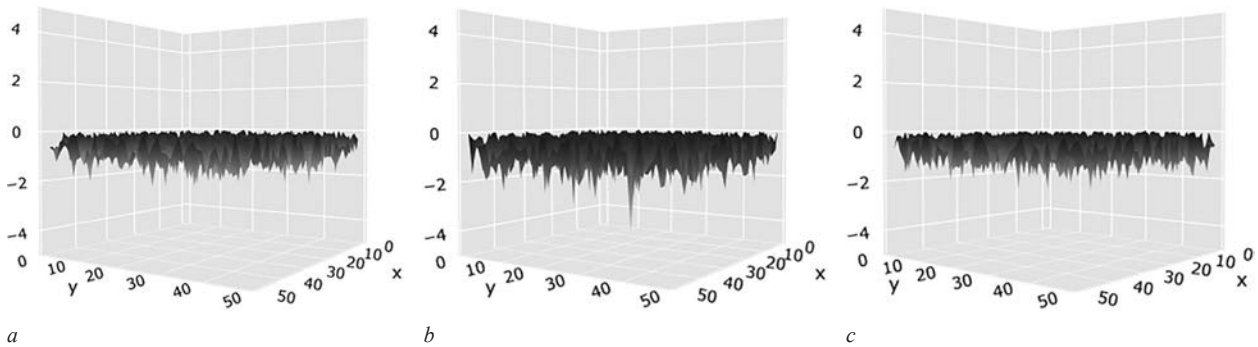


Рисунок 9 — Математическая реконструкция 3D-рельефа: *a* — образец № 3; *b* — образец № 7; *c* — образец № 13
 Figure 9 — Mathematical reconstruction of 3D relief: *a* — sample no. 3; *b* — sample no. 7; *c* — sample no. 13

На рисунке 9 представлена математическая реконструкция 3D-рельефа по параметрам R_{sk} , R_{ku} и соотношению номинальной к полной площади, которое характеризует развитость и рельефность полученного профиля поверхности: для образца № 3 среднее значение $\approx 0,783$; для образца № 7 — $0,818$ (самый высокий показатель); для образца № 13 — $0,761$. Для образца № 7 характерно залегание глубоких «ямок».

Заключение. Математическое моделирование процессов формирования поверхности для микроэлектронных компонент играет важную роль не только в понимании физических и механических процессов, протекающих в приповерхностных слоях при их механической лезвийной обработке, но и в системе технологической подготовки производства. В работе проведены результаты моделирования взаимодействия кремниевой пластины и резца, изготовленного из кубического нитрида бора, в квазидинамической постановке в момент врезания инструмента в обрабатываемую пластину.

Сопоставив данные характеристик напряженного состояния кремниевой пластины, полученных в результате численного моделирования и экспериментального цикла механической обработки резанием, установлено, что одним из критических параметров, который задает оператор установки, является величина припуска, срезаемого за проход, $Z(S_{\text{поп}})$. Исследование характеристик поверхности образца № 7, при обработке которого использовался наибольший припуск из заданных величиной 15 мкм , показывает наибольшие средние величины по параметрам R_a (по площади) $= 548,10$; $R_q = 656,60$; $R_{sk} = 0,60$; $R_{ku} = 2,29$ из всей выборки образцов.

Установлены закономерности, связывающие величину припуска с возникающими при обработке нормальными напряжениями. Их анализ показал, что при уменьшении толщины величины припуска, срезаемого за один проход, $Z(S_{\text{поп}})$ абсолютная величина нормальных напряжений σ_{xx} также устойчиво снижается, а нормальные напряжения σ_{yy} в диапазоне реальных величин $\delta \approx 1 \dots 5 \text{ мкм}$ уменьшаются. Это, на наш взгляд, обусловлено

тем, что для малых глубин резания угол наклона отрезка контактного взаимодействия между пластиной и резцом к оси x уменьшается и влияние на напряженное состояние напряжений σ_{xx} также уменьшается, а одновременно с этим возрастает влияние напряжений σ_{yy} . Результаты данной работы соотносятся с результатами [15], где автор произвел компьютерное моделирование НДС монокристаллического кремния и стекла при внедрении алмазного гравера для оценки наличия дефектов, боковых и радиальных сколов и выявил, что при врезании алмазного инструмента на глубину резания свыше 50 мкм происходит переход к стабильному локальному разрушению материала в зоне резания на составляющие части, при этом выполняется $\tau_{\text{max}} < p(x)$.

Список литературы

1. Трофимов, А.А. Режимы шлифования и полирования пластин из сапфира и карбида кремния, содержащих СВЧ монолитные интегральные схемы / А.А. Трофимов // Прикладная физика. — 2017. — № 3. — С. 89–95.
2. Ha, M.-T. A review of the simulation studies on the bulk growth of silicon carbide single crystals / M.-T. Ha, S.-M. Jeong // Journal of the Korean Ceramic Society. — 2022. — Vol. 59, iss. 2. — P. 153–179. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00188-y>.
3. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. — М.: Машиностроение, 1972. — 105 с.
4. Обработка и упрочнение поверхности при изготовлении и восстановлении деталей / И.В. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца, С.А. Клименко. — Мн.: Бел. наука, 2013. — 462 с.
5. Сироткин, О.С. Основы инновационного материаловедения: моногр. / О.С. Сироткин. — М.: ИНФРА-М, 2016. — 156 с.
6. Радченко, М.В. Электротехническое материаловедение: учебник / М.В. Радченко. — 2-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2023. — 116 с.
7. Friction between silicon and diamond at the nanoscale / L. Bai, Z.-D. Sha, N. Srikanth [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2015. — Vol. 48, no. 25. — DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/25/255303>.
8. Popov, V.L. Contact mechanics and friction: physical principles and applications / V.L. Popov. — Berlin: Springer, 2010. — 362 p.
9. Александров, В.М. Введение в механику контактных взаимодействий / В.М. Александров, М.И. Чебаков. — Ростов-на-Дону: ООО «ЦВВР», 2007. — 114 с.
10. Прочность пластин монокристаллического кремния для солнечных элементов / В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, А.О. Поздняков [и др.] // Журнал технической физики. — 2020. — Т. 90, вып. 1. — С. 79–84. — DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48665.148-19>.

11. Mechanical strength problem of thin silicon wafers (120 and 140 μm) cut with thinner diamond wires (Si kerf 120 \rightarrow 100 μm) for photovoltaic use / H. Sekhar, T. Fukuda, K. Tanahashi [et al.] // *Materials Science in Semiconductor Processing*. — 2020. — Vol. 119. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105209>.
12. Carton, L. Mechanical properties of thin silicon wafers for photovoltaic applications: Influence of material quality and sawing process: diss. ... for the degree of Dr. of Philosophy / Louise Carton; Université de Lyon. — Lyon, 2020. — 240 p.
13. Кремний // TYDEX. — URL: https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/Silicon_ru.pdf (дата обращения 15.05.2025).
14. Experimental and numerical study on thin silicon wafer CO₂ laser cutting and damage investigation / K. Moghadasi, K.F. Tamrin, N.A. Sheikh [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2024. — Vol. 132, iss. 9–10. — P. 4857–4884. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13675-9>.
15. Огородников, А.И. Параметрическое компьютерное моделирование механической обработки хрупких материалов для интеграции в автоматизированную систему технологической подготовки производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / Огородников Алексей Игоревич; Уральский федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. — Екатеринбург, 2021. — 24 с.

MARMYSH Denis E., Ph. D. in Phys. and Math.

Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics¹

E-mail: marmyshde@bsu.by

BASINIUK Vladimir L., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment” – Head of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment²

E-mail: vladbas@mail.ru

TYCHINSKAYA Irina D.

Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”²

E-mail: ira.tychinski@gmail.com

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received January 23, 2026.

ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE THIN SILICON WAFER DURING BLADE CUTTING PROCESS

The article presents the modeling of the stress-strain state (SSS) of a thin silicon wafer during high-speed blade cubic boron nitride cutting process. The mathematical model of the system SSS is formulated, as well as a model of contact interaction between the wafer and the cutter. The mechanical and mathematical model is solved using the finite element method in ANSYS Workbench software package. The distribution of stress fields in the area of contact interaction is analyzed for various values of the cut-off wafer allowance. Patterns have been established that relate the amount of allowance to the normal stresses that occur during processing. Their analysis showed that with a decrease in the cut-off allowance from 20 to 1.5 μm , normal stresses also decrease. This may be due to the fact that at relatively small cutting depths, the angle of inclination of the contact segment between the plate and the cutter to the x axis decreases and the influence of stresses σ_{xx} on the stress state also decreases, while at the same time the influence of stresses σ_{yy} increases. Data on the experimental processing of three silicon wafer samples with preset cutting modes are presented. The numerical variation of the values of the average roughness Ra for all samples varies in the range of 0.25–0.55 μm , the sample with the largest amount of allowance has the highest numerical value for all the characteristics presented. A logarithmic scale with superposition of average values according to the characteristics Ra, Rq, Rsk, Rku, mathematical reconstruction of the 3D relief according to the parameters Rsk, Rku and the ratio of nominal to total area are shown.

Keywords: silicon wafer, cubic boron nitride, stress-strain state, SSS, blade processing, numerical simulation

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-2-75-71-79>

References

1. Trofimov A.A. Rezhimy shlifovaniya i polirovaniya plastin iz saphira i karbida kremniya, soderzhashchikh SVCh monolitnye integralnye skhemy [Modes of lapping and polishing plates made of sapphire and silicon carbide containing microwave monolithic integrated circuits]. *Applied physics*, 2017, no. 3, pp. 89–95 (in Russ.).
2. Ha M.-T., Jeong S.-M. A review of the simulation studies on the bulk growth of silicon carbide single crystals. *Journal of*

- the Korean Ceramic Society*, 2022, vol. 59, iss. 2, pp. 153–179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00188-y>.
3. Torbilo V.M. *Almaznoe vyglazhivanie* [Diamond smoothing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 105 p. (in Russ.).
 4. Borodavko I.V., et al. *Obrabotka i uprochnenie poverkhnostey pri izgotovlenii i vosstanovlenii detaley* [Processing and strengthening of surfaces in the manufacture and restoration of parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2013. 462 p. (in Russ.).
 5. Sirotkin O.S. *Osnovy innovatsionnogo materialovedeniya* [Fundamentals of innovative materials science]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 156 p. (in Russ.).
 6. Radchenko M.V. *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie* [Electrical engineering materials science]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2023. 116 p. (in Russ.).
 7. Bai L., et al. Friction between silicon and diamond at the nanoscale. *Journal of physics D: applied physics*, 2015, vol. 48, no. 25. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/25/255303>.
 8. Popov V.L. *Contact mechanics and friction: physical principles and applications*. Berlin, Springer, 2010. 362 p.
 9. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Vvedenie v mekhaniku kontaktnykh vzaimodeystviy* [Introduction to the mechanics of contact interactions]. Rostov-on-Don, OOO “TsVVR” Publ., 2007. 114 p. (in Russ.).
 10. Shpeizman V.V., et al. Prochnost plastin monokristallichesko-go kremniya dlya solnechnykh elementov [Strength of silicon single-crystal wafers for solar cells]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2020, vol. 90, iss. 1, pp. 79–84. DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48665.148-19> (in Russ.).
 11. Sekhar H., et al. Mechanical strength problem of thin silicon wafers (120 and 140 μm) cut with thinner diamond wires (Si kerf 120 \rightarrow 100 μm) for photovoltaic use. *Materials science in semiconductor processing*, 2020, vol. 119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105209>.
 12. Carton L. *Mechanical properties of thin silicon wafers for photovoltaic applications: Influence of material quality and sawing process*. Ph. D. Thesis. Lyon, 2020. 240 p.
 13. *Kremniy* [Silicon]. Available at: https://www.tydexoptics.com/Silicon_ru.pdf (accessed May 15, 2025) (in Russ.).
 14. Moghadasi K., et al. Experimental and numerical study on thin silicon wafer CO₂ laser cutting and damage investigation. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2024, vol. 132, iss. 9–10, pp. 4857–4884. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13675-9>.
 15. Ogorodnikov A.I. *Parametricheskoe kompyuternoe modelirovanie mekhanicheskoy obrabotki khrupkikh materialov dlya integratsii v avtomatizirovannuyu sistemu tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Parametric computer modeling of mechanical processing of brittle materials for integration into an automated system of technological preparation of production. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Yekaterinburg, 2021. 24 p. (in Russ.).