

УДК 621.382

doi: 10.18698/0536-1044-2019-5-10-16

Формирование дефектного слоя при лезвийной обработке хрупких материалов

Ю.Н. Жуков, И.Н. Тихонов, А.И. Огородников

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Formation of a Defective Layer when Machining Brittle Materials

Y.N. Zhukov, I.N. Tikhonov, A.I. Ogorodnikov

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Детали, сделанные из современных хрупких материалов с высоким качеством обработанной поверхности, востребованы при изготовлении оптических и электронных приборов, а также ответственных узлов в машиностроительных изделиях. Лезвийная обработка алмазным инструментом позволяет формообразовывать такие детали без теплового поражения поверхностных функциональных слоев. Вместе с тем лезвийная обработка хрупких материалов сопровождается формированием на обработанной поверхности дефектного слоя вследствие нарушения структуры материала при силовом воздействии режущего инструмента. Рассмотрены причины и механизм образования дефектного слоя на обработанной поверхности при несвободном резании хрупкого материала. Обсуждены пути уменьшения размеров дефектного слоя. Выполнены теоретический и компьютерный анализы влияния локального поля напряжений в зоне действия сосредоточенной сжимающей силы на поверхность пластины из хрупкого материала. Экспериментальными методами исследован дефектный слой поверхности после нанесения риски трехгранным алмазным инструментом на кремниевую пластину.

Ключевые слова: лезвийная обработка, несвободное резание, хрупкий материал, дефектный слой

Parts made of modern brittle materials with high quality finish are widely used in manufacturing of optical and electronic devices as well as crucial assemblies in mechanical engineering products. Diamond machining enables generation of geometry without affecting the functional surface layers by heat. At the same time, brittle material cutting is accompanied by the formation of a defective layer on the machined surface due to the structural disturbances in the material caused by the applied cutting force. The paper discusses causes and the mechanism of the defective layer formation on the machined surface during non-free cutting of brittle materials and examines ways of reducing the size of the defective layer. Theoretical and computer-aided analysis is performed to determine the impact of the local stresses field in the zone of concentrated pressing force acting on the brittle plate surface. Using experimental methods, a defective layer formed after cutting notches on a silicon plate by a diamond tool is studied.

Keywords: machining, non-free cutting, brittle material, defects layer

В современном машиностроении для изготовления теплонагруженных деталей авиационной и космической техники используют твердые

конструкционные материалы, в частности, керамические композиты с уникальным сочетанием эксплуатационных свойств. Эффективной

механической обработке таких деталей препятствует повышенная хрупкость материала, из которого они выполнены [1].

При их лезвийной и абразивной резке на поверхности формируется дефектный слой с микротрещинами [2], способными снижать износостойкость и долговечность деталей в условиях одновременного воздействия знакопеременной силовой нагрузки, высокой температуры и окислительной рабочей среды. Дефектный слой обработанной поверхности хрупкого конструкционного материала становится также критичным фактором прочности и эксплуатационной надежности в случае соединения деталей с натягом и узлов трения [3].

При механическом формообразовании изделия путем удаления припуска на резку с заготовки независимо от модели локального разрушения материала — хрупкого (ХМ) или вязкого — под его поверхностью образуется слой, для которого характерно значительное изменение структуры обрабатываемого материала [4].

К настоящему времени подробно рассмотрены физические явления, составляющие процесс резания металлических материалов [5, 6], включающие в свой состав локализованную пластическую деформацию и наклеп обработанной поверхности; сжатие и сдвиг микрообъемов материала в срезаемом слое, прилегающем к передней поверхности режущей части инструмента; трение на контактных поверхностях инструмента и заготовки.

В меньшей степени изучены процессы механической обработки неметаллических материалов. К ним относятся фрезерование, сверление и зенкерование отверстий, координатное и профильное шлифование, гравирование, резка и скрайбирование.

Лезвийную обработку алмазным инструментом твердых монокристаллических материалов также активно исследуют в связи с новейшими приложениями в электронике [7]. Проведенные изыскания показывают, что при нанесении риски на поверхность пластин кремния, сапфира и карбида кремния образуется дефектный слой, состоящий из трещин, микротрещин и дислокаций [8]. В случае неоптимальных режимов и способов резания размер дефектного слоя в несколько раз превышает ширину нанесенной риски треугольного сечения. Отдельные трещины распространяются на внешнюю плоскость пластины, образуя сколы — визуально наблюдаемые дефекты обработанной поверхности.

Так как эксплуатация изделий электронной техники с широкой зоной поверхностного повреждения недопустима, технологи ищут прогрессивные способы обработки и усложняют технологические процессы, что ведет к удорожанию готовых изделий.

Решение возникающих проблем лезвийной обработки твердых ХМ состоит в уменьшении (исключении) дефектного слоя обработанной поверхности, что требует применения инструментов компьютерного моделирования [9].

Цель работы — теоретический анализ процессов образования дефектного слоя при лезвийной обработке ХМ с привлечением компьютерных методов.

Теоретический анализ. Предметом теоретического анализа является дефектный слой обработанной поверхности ХМ, разрушаемого под действием упругой деформации при полном контакте инструмента со срезаемым слоем. Количественные характеристики дефектного слоя и параметры управления качеством такой поверхности [10] можно прогнозировать с помощью трехмерной модели процесса резания.

Теоретическое, аналитическое и компьютерное исследование лезвийной обработки твердых ХМ базируются на формализованном представлении геометрии инструмента в виде пирамиды, подробно описанном в работе [11]. В частности, по результатам экспериментов был выбран лезвийный инструмент на основе четырехгранной пирамиды, так как при определенных углах наклона и вариантах заточки он способен улучшить качество обработанной поверхности [12]. Одним из условий повышения качества при резании ХМ является малая скорость резания v , когда глубина резания t превышает значение подачи s .

Трехмерная схема несвободного резания ХМ лезвийным инструментом приведена на рис. 1. Начало координат O перемещается вместе с инструментом из положения O_1 в положение O_2 , позиционируя актуальный момент резания. Ребро пирамиды O_1A_1 служит главной режущей кромкой инструмента, ребро O_1B_1 — вспомогательной режущей кромкой, а образованная режущими кромками поверхность $A_1O_1B_1$ — передней гранью инструмента, по которой в процессе обработки осуществляется сход стружки.

Расстояние O_2A_2 соответствует глубине резания t , расстояние O_2B_2 — подаче s . Схема распространения напряжений в обрабатываемом

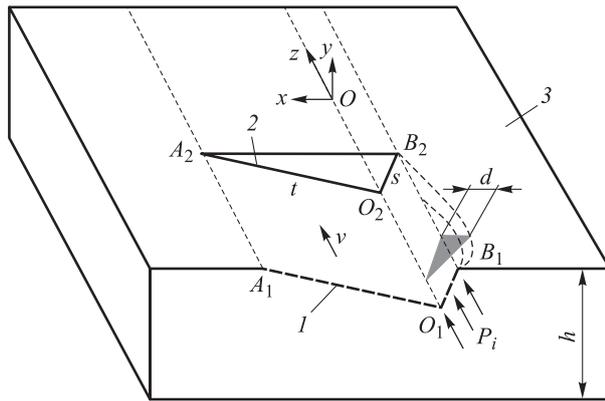


Рис. 1. Трехмерная схема несвободного резания ХМ лезвийным инструментом:

1 — начальное положение инструмента; 2 — текущее положение инструмента; 3 — плоскость пластины со сколами размером d

материале учитывает общую информацию об условиях образования стружки при несвободном резании [13], а также основные моменты упругой деформации срезаемого слоя материала, распространения сжимающих $\sigma_{сж}$ и максимальных касательных τ_{max} напряжений [14] в зоне локального разрушения.

Вдоль режущих кромок O_1A_1 и O_1B_1 в направлении движения инструмента v на обрабатываемый материал действуют равномерно распределенные по длине режущей кромки и равные по значению составляющие P_i силы резания P . При этом в любой момент времени от главной режущей кромки O_1A_1 до свободной поверхности заготовки вдоль радиальных линий распространяются сжимающие напряжения, которые в нормальном сечении в полярной системе координат вычисляются по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{(C_{напр} \cos \Theta)}{r},$$

где $C_{напр}$ — константа, прямо пропорционально зависящая от приложенной нагрузки P ; Θ — угловая координата; r — радиальная координата.

Константа $C_{напр}$ определяется в теоретической модели исходя из возможности заменить сосредоточенную нагрузку равной ей силой, действующей на круглой канавке малого радиуса. Такой подход позволяет при анализе напряженного состояния нивелировать эффект сингулярности, возникающий в точке приложения сосредоточенной силы (в точке, в которой рассматриваемая функция координаты $P(r)$ не дифференцируема). Интегрированием по поверхности приложения силы P для пластины толщиной h получаем коэффициент

$$C_{напр} = -2P/\pi h.$$

Теоретический анализ плоского напряженного состояния пластины под действием сосредоточенной силы подробно рассмотрен М.М. Фрох-том [14]. При воздействии сжимающей сосредоточенной силы на пластину в ней возникает радиальная система напряжений. Соответственно, изоклины (линии, в каждой точке которых направления главных напряжений σ_r и σ_Θ параллельны) поля напряжений в нормальном сечении в полярной системе координат являются прямыми линиями, сходящимися в точке приложения нагрузки. При этом изостаты (траектории главных напряжений — линии, в каждой точке которых касательная совпадает с направлением одного из главных напряжений, действующих в точке касания) образуют систему ортогональных концентрических окружностей (σ_r) с центром в точке приложения нагрузки, пересеченных радиальными линиями (σ_Θ), проходящими через центр этих окружностей.

Наибольший интерес представляют траектории касательных напряжений, показывающие направление их максимальных значений τ_{max} . Так как напряжения τ_{max} действуют под углом 45° к направлению главных напряжений σ_r и σ_Θ , траектории касательных напряжений однозначно вычисляются по изоклинам или изостатам. Решая интегрированием дифференциальное уравнение, выражающее тангенс угла между изоклиной и касательной к траектории касательных напряжений ($rd\Theta/dr = \text{tg}45^\circ$), получаем функцию логарифмической (изогональной) спирали для траектории максимальных касательных напряжений в полярных координатах:

$$r = C_{траект} e^{\Theta},$$

где r — радиальная координата, равная текущему радиусу кривизны траектории; $C_{траект}$ — размерная константа спирали, равная радиальной координате r ($\Theta = 0$) и коррелирующая с радиусом скругления режущего лезвия.

В соответствии с приведенной схемой (см. рис. 1) дефектный слой обработанной поверхности расположен за поверхностью $A_1O_1O_2A_2$. Дефекты этого слоя после резки остаются в изделии как на его поверхности, так и в глубинных слоях материала. Следует также принимать во внимание дефектный слой шириной d , который возникает вдоль направления B_1B_2 и изменяется вместе с отделяемой стружкой.

Обработанная поверхность формообразуется перемещением вспомогательной режущей кромки O_1V_1 в направлении вектора скорости резания, при этом центр координат O_1 вместе с вершиной режущего инструмента перемещается вдоль оси z в новое положение O_2 . Движение режущей кромки сопровождается зарождением и распространением трещин в ХМ.

В связи с актуальностью задачи повышения качества обработанной поверхности представляют интерес длина образующихся трещин и траектории их распространения. Конечная длина хрупкой трещины обусловлена ее торможением в момент выхода растущей трещины из зоны напряжений, превышающих критическое значение разрушающих максимальных касательных напряжений $\tau_{\max \text{ разр}}$. Траектории распространения трещин в ХМ совпадают с траекториями максимальных касательных напряжений $\tau_{\max} = \tau_{\max \text{ разр}}$. Их пространственное положение подчиняется логарифмической зависимости.

В данном теоретическом анализе рассмотрены положения о напряженном состоянии, заключающиеся в том, что локальное разрушение ХМ происходит в условиях сжатия:

- под действием максимальных касательных напряжений τ_{\max} , когда их значение достигает критического $\tau_{\max \text{ разр}}$ в рассматриваемом объеме материала;
- в направлении траектории максимальных касательных напряжений τ_{\max} , которая математически определяется в координатном пространстве логарифмической спиралью.

Если основываться на положениях теоретического анализа, то будет интересно выполнить компьютерный анализ процесса лезвийной обработки ХМ и установить зависимость между параметрами процесса резания и характеристиками формируемого дефектного слоя обработанной поверхности.

Компьютерный анализ. Компьютерный анализ напряженного состояния пластины из ХМ под воздействием сосредоточенной силы был проведен с помощью программы MATLAB. Расчет напряжений выполнялся в рамках упругой и квазистатической модели, так как применяемые скорость и сила резания были малы. Расчетная область ограничивалась четвертью цилиндра с осью z . Построение изостат главных напряжений и траекторий касательных напряжений в соответствии с аналитической моделью было выполнено в полярной системе координат. Полученные траек-

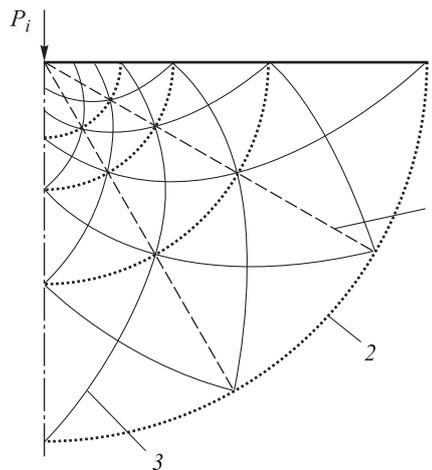


Рис. 2. Траектории напряжений в полярных координатах:
1 — изостаты σ ; 2 — изостаты σ_θ ; 3 — траектории максимальных касательных напряжений τ_{\max}

тории напряжений в сечении плоскостью xOz приведены на рис. 2. Сосредоточенная сила P_i приложена в точке воздействия режущей кромки на обрабатываемый материал.

Траектории максимальных касательных напряжений τ_{\max} представляют собой семейство изогональных спиралей, показывающих возможные направления распространения трещин и границы дефектного слоя. Разрушение материала в виде мелких фрагментарных сколов локализовано в области, ограниченной линией $\tau_{\max} = \tau_{\max \text{ разр}}$. Предполагается, что локальное разрушение происходит мгновенно при достижении критериальным параметром предельного значения в ограниченной области.

Практическое приложение результатов теоретического и компьютерного анализа. В данной работе компьютерными и экспериментальными методами исследован единичный акт резания пластины из монокристаллического кремния алмазным инструментом, имеющим у вершины три грани. Локальное разрушение монокристаллического кремния происходит вдоль кристаллографических плоскостей и усиливается при наличии поверхностных нарушений структуры, концентрирующих напряжения. Фотографическое изображение риски, нанесенной на поверхность кремниевой пластины алмазным инструментом с силой резания 0,5 Н после одного прохода вдоль оси z , приведено на рис. 3. Экспериментальное исследование риски методами оптической микроскопии выявляет дефектную зону, ширина которой в несколько раз превышает ширину самой риски.

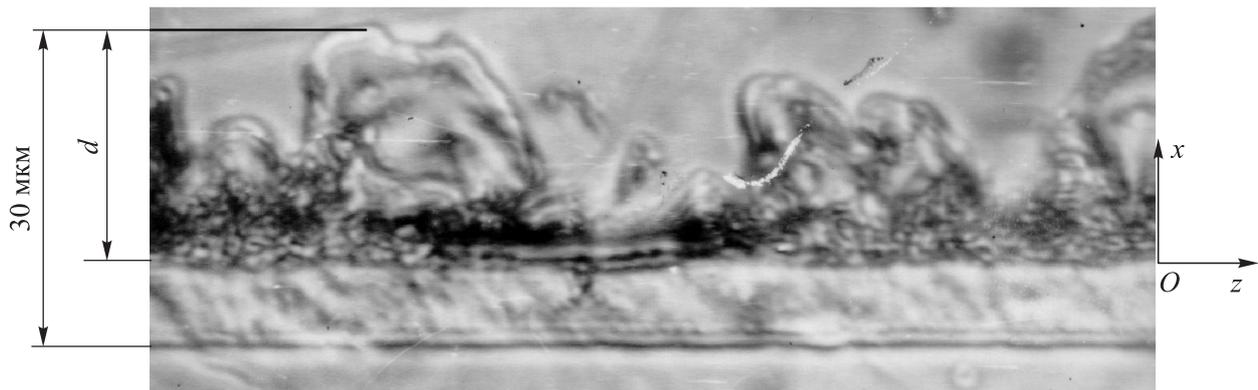


Рис. 3. Фотографическое изображение риски, нанесенной на поверхность кремниевой пластины алмазным инструментом с силой резания 0,5 Н после одного прохода вдоль оси z

Дефектный слой обработанной поверхности порожден трещинами, зародившимися в точках контакта обрабатываемого материала с режущей кромкой. Эти трещины распространяются в области повышенных напряжений и останавливаются, достигнув пространства, где выполняется условие $\tau_{\max} \leq \tau_{\max \text{ разр}}$. Некоторые трещины выходят на видимую поверхность и при условии $\tau_{\max} \geq \tau_{\max \text{ разр}}$ образуют сколы шириной d , нарушая таким образом плоскостность обработанной поверхности.

Результаты проведенных экспериментов по нанесению рисок на поверхность кремниевой пластины алмазным инструментом с различными углами резца подтверждают, что быстрым и эффективным способом управления дефектным слоем обработанной поверхности является ее формообразование главной режущей кромкой, когда длина режущей кромки O_1A_1 превышает длину O_1B_1 (см. рис. 1) в 7 раз и более (глубина резания t больше подачи s в 7–10 раз). В этом случае дефектный слой оказывается наименьшим из рассмотренных вариантов лезвийной обработки, что соответствует классическим экспериментальным данным [15].

Выводы

1. Выполнен как теоретический, так и компьютерный анализ локального поля напряже-

ний в пластине из ХМ при воздействии лезвийного режущего инструмента.

2. Рассмотрены схема распространения сжимающих и максимальных касательных напряжений в обрабатываемом материале, а также условия образования дефектной зоны, состоящей из трещин и сколов. Трещины распространяются от точки приложения сосредоточенной силы по траекториям максимальных касательных напряжений, отображенным в пространстве изогнутыми спиралями. Фрагментарные сколы сосредоточены в области, ограниченной линиями разрушающих максимальных касательных напряжений.

3. Экспериментальными методами показано соответствие прогнозируемой дефектной зоны и наблюдаемой полосы разрушений вдоль риски, нанесенной на поверхность кремниевой пластины трехгранным алмазным инструментом. Выбраны режимы резания пластины из монокристаллического кремния алмазным инструментом, обеспечивающие минимальное дефектообразование обработанной поверхности. Алмазным резцом на поверхности пластины формируется риска глубиной до 10...15 мкм и шириной до 20...25 мкм. При этом возможно получение риски со сторонами, не содержащими сколов.

Литература

- [1] Балыков А.В., Липатова А.Б. Эффективная обработка хрупких неметаллических материалов. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2008, № 2, с. 14–19.
- [2] Агафонов С.В., Михайлов С.В., Ковеленов Н.Ю. Прогнозирование и управление качеством поверхностного слоя неспеченных керамических заготовок при обработке резанием. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2017, т. 19, № 1(2), с. 207–210.

- [3] Никанорова Л.В., Лосева М.В. Керамические материалы в автомобилестроении. *Вестник АнГТУ*, 2016, № 10, с. 192–193.
- [4] Старков В.К. *Физика и оптимизация резания материалов*. Москва, Машиностроение, 2009. 640 с.
- [5] Подураев В.Н. *Резание труднообрабатываемых материалов*. Москва, Высшая школа, 1974. 590 с.
- [6] Грубый С.В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2017, № 1, с. 25–37, doi: 10.24108/aplts.0117.0000058
- [7] Yan J., Asami T., Harada H., Kuriyagawa T. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining. *Precision Engineering*, 2009, vol. 33, pp. 378–386, doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.10.008
- [8] Wiegold S., Morishige A.E., Meyer L., Buonassisi T., Sachs E.M. Crack detection in crystalline silicon solar cells using dark-field imaging. *Energy Procedia*, 2017, vol. 124, pp. 526–531, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.252
- [9] Огородникова О.М. Методы и инструменты цифрового машиностроения для компьютерного моделирования технологий и конструкций. *Научное обозрение*, 2015, № 10-1, с. 209–212.
- [10] Огородников А.И., Власов В.Н., Огородникова О.М. Компьютерная оценка ожидаемого качества в системе управления технологическими процессами механической обработки. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2015, № 1, с. 123–127.
- [11] Жуков Ю.Н., Тихонов Э.Е., Савиных К.М., Огородников А.И. Лезвийный инструмент для разделительных операций хрупких листовых заготовок. *Вестник машиностроения*, 2015, № 3, с. 25–29.
- [12] Жуков Ю.Н., Тихонов И.Н. *Способ скрайбирования полупроводниковых пластин и резац для его осуществления*. А.с. 1271301 СССР, 1986, бюл. № 35, 3 с.
- [13] Жуков Ю.Н. *Исследование геометрии инструмента и режимов резания при обработке криволинейных поверхностей на станках с числовым программным управлением*. Дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1973, с. 36–42.
- [14] Фрохт М.М. *Фотоупругость*. Ленинград, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. 488 с.
- [15] Жуков Ю.Н. Особенности стружкообразования при несвободном резании металлов. *Научно-технический прогресс в промышленности. Тез. докл. Первой науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов Уральской зоны*, Свердловск, 1974, с. 44–45.

References

- [1] Balykov A.V., Lipatova A.B. Efficient processing of brittle non-metallic materials. *Vestnik of MSTU "Stankin"*, 2008, no. 2, pp. 14–19 (in Russ.).
- [2] Agafonov S.V., Mikhaylov S.V., Kovelonov N.Yu. Prediction and management of surface layer quality of green ceramic preforms at processing by cutting. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 1(2), pp. 207–210 (in Russ.).
- [3] Nikanorova L.V., Loseva M.V. Ceramic materials in the automotive industry. *Vestnik AnGTU*, 2016, no. 10, pp. 192–193 (in Russ.).
- [4] Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of material cutting]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2009. 640 p.
- [5] Podurayev V.N. *Rezaniye trudnoobrabatyvayemykh materialov* [Cutting of difficult-to-process materials]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1974. 590 p.
- [6] Grubyy S.V. Calculating Parameters of Chip Formation and Cutting Forces of Plastic Materials. *Machines and Plants: Design and Exploiting*, 2017, no. 1, pp. 25–37 (in Russ.), doi: 10.24108/aplts.0117.0000058
- [7] Yan J., Asami T., Harada H., Kuriyagawa T. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining. *Precision Engineering*, 2009, vol. 33, pp. 378–386, doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.10.008
- [8] Wiegold S., Morishige A.E., Meyer L., Buonassisi T., Sachs E.M. Crack detection in crystalline silicon solar cells using dark-field imaging. *Energy Procedia*, 2017, vol. 124, pp. 526–531, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.252

- [9] Ogorodnikova O.M. Methods and tools of digital engineering for computer simulation. *Nauchnoye obozreniye*, 2015, no. 10–1, pp. 209–212 (in Russ.).
- [10] Ogorodnikov A.I., Vlasov V.N., Ogorodnikova O.M. Predictive evaluating of expected quality in process control system of machining. *Engineering and Automation Problems*, 2015, no. 1, pp. 123–127 (in Russ.).
- [11] Zhukov Yu.N., Tikhonov E.E., Savinykh K.M., Ogorodnikov A.I. Edge tool for shearing operations of brittle sheet workpieces. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2015, no. 3, pp. 25–29 (in Russ.).
- [12] Zhukov Yu.N., Tikhonov I.N. *Sposob skraybirovaniya poluprovodnikovyykh plastin i rezets dlya ego osushchestvleniya* [Method for scribing semiconductor wafers and cutter for its implementation]. Avtorskoye svidetel'stvo SSSR no. 1271301, 1986, 3 p.
- [13] Zhukov Yu.N. *Issledovanie geometrii instrumenta i rezhimov rezaniya pri obrabotke krivolinyykh poverkhnostey na stankakh s chislovyim programm-nyim upravleniem*. Kand. Diss. [The study of tool geometry and cutting conditions when machining curved surfaces on machine tools with numerical program control. Cand. Diss.]. Sverdlovsk, 1973, pp. 36–42.
- [14] Frokht M.M. *Fotouprugost'* [Photoelasticity]. Leningrad, Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury publ., 1950. 488 p.
- [15] Zhukov Yu.N. Features of chip formation with non-free cutting of metals. *Nauchno-tekhnicheskiiy progress v promyshlennosti. Tez. dokl. Pervoy nauch.-tekhn. konf. molodykh uchennykh i spetsialistov Ural'skoy zony* [Abstracts of the reports of the First Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Ural Zone]. Sverdlovsk, 1974, pp. 44–45.

Статья поступила в редакцию 31.01.2019

Информация об авторах

ЖУКОВ Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронное машиностроение». ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, Екатеринбург, Российская Федерация, ул. Мира, д. 19, e-mail: emb@urfu.ru).

ТИХОНОВ Игорь Николаевич — кандидат технических наук, зав. кафедрой «Электронное машиностроение». ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, Екатеринбург, Российская Федерация, ул. Мира, д. 19, e-mail: i.n.tihonov@urfu.ru).

ОГОРОДНИКОВ Алексей Игоревич — старший преподаватель кафедры «Электронное машиностроение». ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, Екатеринбург, Российская Федерация, ул. Мира, д. 19, e-mail: al.ogorodnikov@bk.ru).

Information about the authors

ZHUKOV Yuri Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Electronic Engineering. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 19, e-mail: emb@urfu.ru).

TIKHONOV Igor Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Head of Department, Electronic Engineering. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 19, e-mail: i.n.tihonov@urfu.ru).

OGORODNIKOV Aleksei Igorevich — Senior Lecturer, Department of Electronic Engineering. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education — Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Ekaterinburg, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 19, e-mail: al.ogorodnikov@bk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Жуков Ю.Н., Тихонов И.Н., Огородников А.И. Формирование дефектного слоя при лезвийной обработке хрупких материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 10–16, doi: 10.18698/0536-1044-2019-5-10-16

Please cite this article in English as:

Zhukov Y.N., Tikhonov I.N., Ogorodnikov A.I. Formation of a Defective Layer when Machining Brittle Materials. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 5, pp. 10–16, doi: 10.18698/0536-1044-2019-5-10-16