ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.9.01

Основные механизмы удаления заусенцев на деталях при вибрационной обработке

Г.А. Прокопец, А.А. Прокопец, С.М. Хидешели, Д.Ш. Енгалычев
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
В работе рассмотрены дефекты в виде заусенцев, возникающих при механической обработке деталей резанием; обоснована необходимость их удаления и представлены наиболее значимые параметры заусенцев в контексте рассматриваемой проблемы. Выполнен подробный анализ процесса удаления заусенцев при виброабразивной обработке, выявлены основные механизмы их устранения и предложена их градация по степени влияния на данный процесс в зависимости от параметров заусенцев, физико-механических свойств материала деталей и конкретных условий обработки. Обоснована возможность управления процессом удаления заусенцев путем интенсификации приоритетного механизма и снижения роли нежелательного механизма.

Ключевые слова: заусенец, дефектоносная операция, усталость, микрорезание, пластическая деформация, вибрационная абразивная обработка

Для цитирования. Прокопец Г.А., Прокопец А.А., Хидешели С.М., Енгалычев Д.Ш. Основные механизмы удаления заусенцев на деталях при вибрационной обработке. *Молодой исследователь Дона.* 2026;11(4):12–16.

Main Techniques for Deburring the Parts by Vibratory Finishing

Galina A. Prokopets, Anatoly A. Prokopets, Stanislav M. Khidesheli, Damir S. Engalychev
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract.
The paper studies the burr formation defect occurring during machining the parts by cutting. The need to remove burrs was justified, and the most significant parameters of burrs referring to the problem under study were defined. The detailed analysis of the deburring process by vibro-abrasive machining was conducted, the main deburring techniques were identified, and classification thereof by the effect reached was provided depending on the parameters of the burrs, the physico-mechanical properties of the material of the parts and the exact conditions of machining. The possibility of managing the deburring process by intensifying the effect of the preferred technique and weakening the effect of the unwanted one was substantiated.

Keywords: burr, defect-causing operation, fatigue, micro-cutting, plastic deformation, vibro-abrasive machining

For Citation. Prokopets GA, Prokopets AA, Khidesheli SM, Engalychev DS. Main Techniques for Deburring the Parts by Vibratory Finishing. *Young Researcher of Don*. 2026;11(4):12–16.

Введение. Ресурс изделий машиностроения зависит от многих факторов, которые учитываются на различных этапах технической подготовки производства. Он закладывается конструктором при проектировании изделия и обеспечивается технологом при разработке технологических процессов сборки и изготовления его деталей. Вместе с тем в ходе реализации технологических процессов могут возникать различные дефекты, устранение которых требует введения в технологический процесс соответствующих переходов или дополнительных операций. К числу таких дефектов относятся заусенцы, образующиеся на кромках деталей из металлических сплавов при механической обработке заготовок.

Постановка проблемы. Одним из дефектов, возникающих при лезвийной, а нередко и абразивной механической обработке резанием деталей из металлических сплавов, являются заусенцы, наличие которых в большинстве случаев недопустимо. Как правило, данный дефект является устранимым. Согласно ГОСТ 21014–2022[1],

[1] ГОСТ 21014-2022. *Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения.* Дата введения 2022-09-01. URL: https://rosgosts.ru/file/gost/77/080/gost_21014-2022.pdf (дата обращения: 11.05.2026).

© Прокопец Г.А., Прокопец А.А., Хидешели С.М., Енгалычев Д.Ш., 2026

заусенец — это «дефект поверхности, представляющий собой острый, в виде гребня, выступ, образовавшийся при резке металла». Наиболее часто заусенцы образуются при обработке лезвийным инструментом достаточно пластичных конструкционных материалов. Однако они могут возникать и при размерной абразивной обработке. В этом случае заусенцы имеют существенно меньшие размеры, что, в частности, связано с тем, что размерной абразивной обработке, как правило, подвергаются детали из менее пластичных материалов, а величина снимаемого припуска значительно меньше.

В процессе резания на кромке детали в месте выхода инструмента наблюдается пластическая деформация, характер которой зависит от материала детали, наличия или отсутствия предварительной термической обработки, вида и режима обработки и др. [1]. При обработке резанием железоуглеродистых сплавов заусенцы обычно представляют собой выпуклые острые неровности на кромках деталей (рис. 1).

а)

б)

Рис. 1. Заусенцы на кромках деталей, формирующиеся в местах выхода режущего инструмента:
а — при фрезеровании впадин на зубчатом колесе; *б* — при сверлении отверстия.

В большинстве случаев удаление заусенцев является обязательным, поскольку они могут нарушать позиционирование детали в сборочной единице, служить концентраторами напряжений, обламываться и попадать в рабочую зону механизма, например при работе зубчатой передачи, а также приводить к травмированию работников и другим нежелательным последствиям. При этом необходимость удаления заусенцев обусловливает увеличение трудоемкости изготовления деталей и, соответственно, повышение их технологической себестоимости, что следует рассматривать как негативный фактор. Следовательно, необходимо выявить пути управления процессом обработки с целью его оптимизации. Все изложенное свидетельствует об актуальности проводимого исследования.

Аналитическая часть. К основным параметрам заусенца, значимым в рамках рассматриваемой проблемы, можно отнести:

– размеры заусенца, в том числе размер поперечного сечения его основания в направлении подачи инструмента;
– геометрическую форму заусенца;
– расположение заусенца с точки зрения доступности для удаления (локализацию);
– дефектность структуры материала в основании заусенца;
– материал детали и его физико-механические свойства;
– наличие концентраторов напряжений в основании заусенца и некоторые другие параметры.

Одним из эффективных методов удаления заусенцев на кромках деталей является виброабразивная обработка, представляющая собой съем мельчайших частиц металла с поверхности обрабатываемой детали путем многократного ударного взаимодействия с абразивными гранулами [2–4]. Основным преимуществом данного вида обработки является высокая гибкость инструмента (обрабатывающей среды), а основным недостатком — сравнительно низкая производительность технологической операции. Поэтому при проектировании технологической операции виброабразивной обработки с целью удаления заусенцев необходимо одновременно решать задачу оптимизации ее параметров по критерию трудоемкости.

Анализ процесса удаления заусенцев при виброабразивной обработке свидетельствует о его сложности, поскольку одновременно реализуются несколько механизмов, участвующих в удалении заусенцев. Тем не менее в зависимости от конкретных условий один из этих механизмов является преобладающим, а остальные — вторичными.

Проанализируем основные механизмы удаления заусенцев при виброабразивной обработке.

1. Срезание заусенцев путем снятия микростружки с их поверхностей. Съем мельчайших частиц металла с поверхности обрабатываемой детали (микростружки) происходит в результате многократного ударного взаимодействия абразивных частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью, их внедрения в нее и последующего проскальзывания по ней, сопровождающегося съемом материала.

2. Обламывание заусенца под действием знакопеременных нагрузок. Любой материал имеет предел усталостной прочности. У деталей из железоуглеродистых сталей он в среднем составляет 105–107 циклов. Однако это базовые значения, которые необходимо корректировать в зависимости от ряда факторов [5], влияющих на эффективную энергию взаимодействия частицы рабочей среды с заусенцем либо ограничивающих ее. К основным факторам относятся:

– масштабный фактор: размеры и масса детали, размеры заусенца, размеры и масса частицы рабочей среды, объем (масса) загрузки рабочей камеры и др.;

– качество поверхности заготовки (шероховатость поверхности, радиус скругления впадин неровностей, форма опорной кривой профиля и др.);

– наличие концентраторов напряжений в области расположения заусенца и в самом заусенце; при формировании заусенца на дефектоносной технологической [2]операции у его основания, как правило, образуется микротрещина (острая впадина), которая резко, в 2,8–4,2 раза, снижает предел усталостной прочности;

– температурный фактор: при виброабразивной обработке данный коэффициент с достаточной степенью достоверности может быть принят равным единице, поскольку температура в рабочей камере при обработке повышается незначительно; также незначительно возрастает температура в зоне резания за счет небольших сил резания, постоянной промывки и дискретности процесса резания;

– фактор надежности, содержание которого в рамках поставленной задачи зависит прежде всего от качества исходного материала, а также вида и параметров технологической операции.

При условии, что обламывание заусенца происходит только в результате знакопеременного нагружения, число циклов нагружения, необходимое для его обламывания при виброабразивной обработке, с достаточной степенью достоверности может быть принято равным числу колебаний рабочей камеры за время от начала обработки до момента обламывания заусенца. Данная величина будет определяться в соответствии с уточненной величиной предела выносливости, которую можно определить по формуле [5]:

$$\sigma_{-1\,расч} = \sigma_{-1\,табл} \times K_a \times K_d \times K_t \,/\, \left(K_f \times K_r\right), \quad (1)$$

где $\sigma_{-1\,табл}$ — табличное значение предела выносливости; K_a = 0,5…1,0 — коэффициент качества поверхности; K_d = 0,7…1 — масштабный коэффициент; K_t = 0,8…1,2 — температурный коэффициент; K_f — коэффициент концентрации напряжений; K_r = 0,8…1,0 — коэффициент надежности.

3. Пластическая деформация заусенца. При соударении частицы рабочей среды с поверхностью заусенца происходит не только срезание микростружки, но и его упругая и пластическая деформация. Последняя приводит не только к изменению формы заусенца, но и к его вытягиванию в направлении перемещения частицы рабочей среды, то есть к уменьшению площади его сечения. В определенный момент заусенец может изогнуться настолько, что практически «ляжет» на поверхность детали.

Согласно правилу Минера, «доля повреждения, накопленная при каждом уровне напряжения, может быть выражена как отношение числа циклов нагружения при данном напряжении к числу циклов, необходимых для разрушения при том же уровне напряжения. Суммарное повреждение получается путем сложения всех долей повреждений» [5]. Однако необходимо учитывать, что при удалении заусенцев имеет место одновременное проявление всех трех рассмотренных выше механизмов, причем данное воздействие не носит линейного характера во времени. Более того, сила соударения частицы рабочей среды с обрабатываемой поверхностью, в том числе с заусенцем, при каждом последующем колебании рабочей камеры не является постоянной и может быть охарактеризована лишь некоторой средней величиной. В связи с этим для вибрационной абразивной обработки правило Минера с физической точки зрения может быть интерпретировано следующим образом: каждый цикл нагружения снижает предел выносливости материала нагружаемого элемента, то есть удаляемого заусенца, вследствие накопления и суммирования повреждений с учетом последовательного уменьшения его размеров. После исчерпания ресурса происходит разрушение — слом заусенца, на месте которого образуются микрозаусенцы,

[2] ГОСТ Р 40.003-2000. *«Система сертификации ГОСТ Р. Регистр систем качества. Порядок проведения сертификации систем качества и сертификации производств».* URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294848/4294848772.pdf (дата обращения: 15.05.2026).

уже практически не подверженные усталостному разрушению и удаляемые преимущественно за счет микрорезания и пластической деформации.

Анализ механизмов удаления заусенцев позволяет определить пути управления данным процессом. Например, в работе [6] приведены результаты экспериментальных исследований удаления заусенца на образцах из латуни «с искусственно полученным заусенцем разной толщины» в рабочей среде ПТ зернистостью 40 в форме конуса. Полное время удаления заусенца высотой 1,457 мм и толщиной 0,214 мм превышает десять часов, что, в частности, обусловлено малой массой образцов. Анализ представленных результатов показывает, что наличие пластической деформации и высокая усталостная прочность латуни приводят к тому, что в процессе обработки заусенец удаляется главным образом за счет микрорезания. При этом он постепенно загибается, и, когда его толщина достигает определенной величины, прижимается к поверхности детали, что облегчает дальнейшее удаление вследствие интенсификации срезания микростружек в области основания заусенца. Однако после срезания основного заусенца формируется вторичный заусенец, и процесс повторяется. Обламывание заусенца практически не наблюдается; скорее имеет место его обрыв в результате приложения растягивающих нагрузок. Существенно сократить время обработки можно, используя комбинированные рабочие среды. Так, в работе [7] для интенсификации процесса виброотделки деталей радиоэлектронной аппаратуры рассматривается возможность введения в состав рабочей среды «активирующих гранул» с целью управления ее насыпной плотностью.

При использовании комбинированных рабочих сред увеличение насыпной плотности рабочей среды позволяет повысить величину единичной срезаемой микростружки. Однако в случае обработки пластичных материалов с высоким пределом усталостной прочности целесообразно применение не только «активирующих», но и активных компонентов. В частности, формирование рабочей среды из смеси абразивных гранул и стальных шаров аналогичных размерных характеристик позволяет не только значительно снизить трудоемкость обработки, но и уменьшить износ рабочей среды. Указанный эффект достигается за счет интенсификации процесса микрорезания под влиянием следующих факторов: – увеличения насыпной плотности рабочей среды, вследствие чего возрастает усилие микрорезания; – значительной пластической деформации заусенца с его загибом до прижатия к поверхности детали, что улучшает условия резания, в том числе за счет упрощения доступа к основанию заусенца и повышения жесткости удаляемого элемента; – ускорения удаления вторичного заусенца за счет комбинированного действия микрорезания и пластической деформации и др. При этом также обеспечивается снижение дефектности структуры на кромках детали после удаления заусенца.

Заключение. В зависимости от совокупности физико-механических свойств материала обрабатываемой детали преобладает один из рассмотренных механизмов удаления заусенцев. При этом во всех случаях последовательность протекания этапов цикла нагружения в целом остается неизменной, а именно:

– упругая деформация заусенца, вызывающая его изгиб и, соответственно, возникновение напряжений растяжения на контактной поверхности и напряжений сжатия на тыльной поверхности заусенца;

– внедрение частицы рабочей среды в поверхностный слой материала, срезание микростружки с поверхности заусенца, причем наибольшее значение имеет сечение стружки, срезаемой у основания заусенца;

– пластическая деформация заусенца, вызывающая его удлинение и уменьшение площади поперечного сечения; на данном этапе существенное значение имеет масштабный фактор;

– упругое восстановление заусенца, то есть снятие напряжений (знакопеременная нагрузка); на данном этапе большое значение имеет наличие концентраторов напряжений, возникновение которых практически неизбежно при образовании заусенца на дефектоносной операции.

Проведенный анализ свидетельствует о сложности процесса удаления заусенца и участии в нем нескольких механизмов разрушения материала. При этом наблюдается взаимное влияние указанных механизмов, а также их совокупное воздействие на протекание последующих циклов нагружения.

Анализ механизмов удаления заусенцев позволяет сделать вывод о возможности управления данным процессом путем интенсификации того или иного механизма и снижения роли нежелательного механизма. Регулирование степени влияния каждого из механизмов, а также их взаимного воздействия, может осуществляться несколькими способами, в том числе за счет формирования комбинированных рабочих сред с определенным соотношением компонентов. Выявление степени влияния каждого из факторов и разработка моделей, предназначенных для управления и оптимизации процесса удаления заусенцев методом вибрационной абразивной обработки, требуют проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Москвитин А.В., Красилов В.В. Анализ причин возникновения заусенцев при механической обработке. *В: Труды Международной научно-практической конференции. Кемерово, 31 мая 2021*. Кемерово: Западно-Сибирский научный центр; 2021. С. 83–85

2. Бабичев А.П. *Основы вибрационной технологии*. Ростов-на-Дону, 1994. 187 с.

3. Прокопец А.А., Прокопец Г.А., Лисицкий Л.О. Анализ показателей надежности технологического процесса на примере виброабразивной обработки. *В: Труды XII-ой Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» Курск, 19–20 марта 2015 г.: в 4-х томах.* Том 3. Курск: Университетская книга; 2015. С. 345–349

4. Прокопец Г.А., Прокопец А.А., Ерина Т., Гвиздон Е. Анализ технологической операции вибрационной абразивной обработки как целостной динамической системы. *В: Труды конференции «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий». г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2020 г.* Ростов-на-Дону: Донской Государственный Технический Университет; 2020. С. 306–310

5. *Сайт компании Иннер Инжиниринг* URL: https://inner.su/articles/tablitsy-ustalostnoy-prochnosti-metallov (дата обращения: 11.05.2026).

6. Косягин Е.М., Ефанов Ю.Ю., Кожухова А.В. Исследование процессов скругления острых кромок и удаления заусенцев при вибрационной обработке. В*: Межвузовский сборник научных статей «Вопросы вибрационной технологии»*, г. Ростов-на-Дону; 1999. С. 47–51.

7. Колганова Е.Н. *Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия.* Ростов-на-Дону; 2022. 18 с.

Об авторах:

Галина Анатольевна Прокопец, доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), i@aa-pro.ru

Анатолий Александрович Прокопец, ведущий инженер кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), i@aa-pro.ru

Станислав Мерабович Хидешели, бакалавр кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), frodosambek@gmail.com

Дамир Шамилевич Енгалычев, магистр кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), engalycevdamir0@gmail.com

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Galina A. Prokopets, Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), i@aa-pro.ru

Anatoly A. Prokopets, Lead Engineer of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), i@aa-pro.ru

Stanislav M. Khidesheli, Bachelor's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), frodosambek@gmail.com

Damir S. Engalychev, Master's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), engalycevdamir0@gmail.com

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.