

**ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВКИ**

А.А. Чудина

a.a.volod@yandex.ru
SPIN-код: 2464-8227

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные сведения об остаточных напряжениях и приведена классификация остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое деталей. Проанализированы основные причины возникновения остаточных напряжений и установлены факторы, влияющие на них. Сделаны выводы, что остаточные напряжения на поверхности детали в результате механической обработки лезвийным инструментом могут быть вызваны тремя основными причинами: неравномерными пластическими деформациями в зоне резания в результате силового воздействия инструмента на заготовку, высокими температурами, сопровождающие процесс резания, и структурно-фазовые превращения, происходящие на поверхности заготовки. Результаты работы могут быть в дальнейшем использованы при более подробном изучении степени влияния факторов на характер и значения остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали после механической обработки лезвийным инструментом.

Ключевые слова

Остаточные напряжения, причины возникновения, технологические факторы, механическая обработка, эксплуатационные свойства, температура, сила резания, инструмент, заготовка, поверхностный слой

Поступила в редакцию 07.12.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Быстрое развитие современного машиностроения ставит перед технологами и конструкторами ряд технологических задач, возникновение которых обусловлено усложнением конструкций машин и механизмов, а также появлением новых материалов, обладающих особыми свойствами. Например, для изделий, работающих в условиях перепада температур или при повышенных нагрузках, предъявляют высокие требования к параметрам качества поверхностного слоя (шероховатости, степени упрочнения, остаточным напряжениям).

В данной работе рассмотрены остаточные напряжения, которые образуются в поверхностном слое при механической обработке и являются важными параметрами качества изделия.

Многолетний опыт эксплуатации изделий и проведение различных экспериментов позволяет сделать вывод, что остаточные напряжения влияют на из-

носостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и долговечность изделий, и особенно на геометрическую точность.

Основные понятия и определения остаточных напряжений. Отличительной особенностью остаточных напряжений, возникающих в результате механической обработки, является их воздействие на поверхностные слои деталей. Однако такие напряжения могут существенно влиять на прочность и износостойкость изделия.

При точении цилиндрических деталей нормальные напряжения распределяются следующим образом (рис. 1) [1–6]:

- осевые σ_o , действующие в направлении подачи;
- окружные (тангенциальные) σ_τ , действующие в направлении вектора скорости резания;
- радиальные σ_r , действующие перпендикулярно обрабатываемой поверхности.

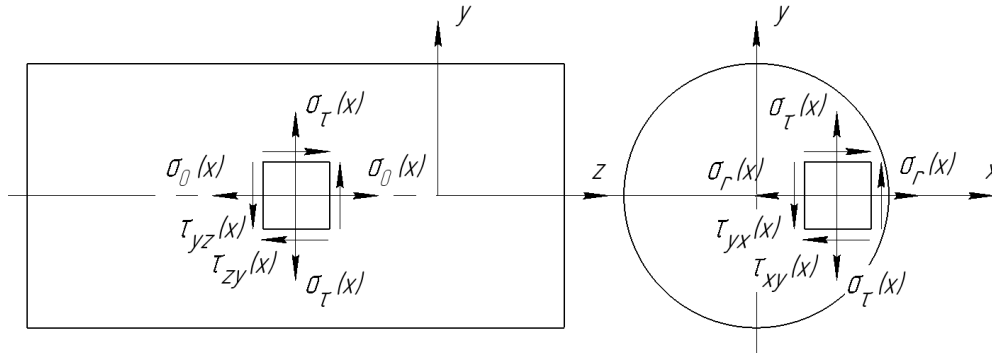


Рис. 1. Схема распределения нормальных σ и касательных τ остаточных напряжений в поверхностном слое детали по осям x, y, z

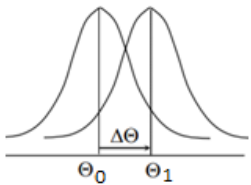
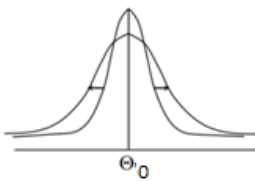
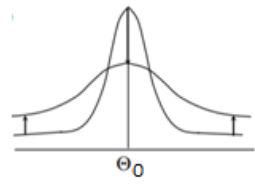
Остаточные напряжения могут иметь различный знак, который зависит от характера и интенсивности физико-механических процессов, происходящих при резании. Различают сжимающие и растягивающие напряжения.

В 1930-е годы Н.Н. Давиденковым была предложена наиболее подробная и точная классификация остаточных напряжений, основанная на рентгеновских данных об изменении межатомных расстояний [7–10], согласно которой напряжения могут быть трех видов: первого рода (макронапряжения), второго рода (микронапряжения) и третьего рода (субмикронапряжения) — см. таблицу.

Напряжения второго и третьего рода уравниваются в малых объемах. Это усложняет изучение их влияния на эксплуатационные свойства изделий. Поэтому далее рассмотрим только остаточные напряжения первого рода, которые оказывают значительное влияние на износостойкость поверхности и усталостную прочность деталей.

Причины возникновения остаточных напряжений. Рассмотрим причины возникновения остаточных напряжений первого рода. Возникновение

Классификация остаточных напряжений

Характеристика	Первого рода (макронапряжения)	Второго рода (микронапряжения)	Третьего рода (субмикронапряжения)
Объемы уравнивания	Одного порядка с размерами тела	Одного порядка с размерами зерен	Одного порядка с размерами элементарной кристаллической ячейки
Причины возникновения	Неоднородное охлаждение или нагрев, силовые воздействия или фазовые структурные превращения	Анизотропия кристаллов, наличие различных фаз, дислокаций и взаимодействия зерен между собой	Наличие в металле дислокаций, появляющихся в результате деформаций
Влияние	На механические свойства металла и на его поведение под действием нагрузок (изменение размеров, коробление, разрушение)	Снижают способность металла пластически деформироваться и повышают вероятность хрупкого разрушения изделий	Нарушают кристаллическую структуру металла
Определение на рентгенограмме*	По смещению интерференционных линий ($\Delta\theta$) 	По размытию линий 	По ослаблению интенсивности линий высшего порядка и усилению диффузионного фона 
* Рентгенограмма — изображение объекта, полученное путем воздействия на него рентгеновским излучением и зафиксированное на чувствительном к этому излучению материале. ** θ_0 — угол дифракции при отсутствии деформации; θ_1 — угол дифракции при деформации; $\Delta\theta$ — разница между θ_0 и θ_1 .			

макронапряжений при обработке резанием может быть вызвано тремя основными причинами [11–17]:

Первой причиной служат пластические деформации, возникающие в процессе механической обработки в поверхностном слое заготовки, которые приводят к изменению физико-механических свойств металла, в том числе к уменьшению плотности и, как следствие, к увеличению объема. Однако увеличению объема пластически деформированного поверхностного слоя мешают нижележащие упруго деформированные слои. В связи с этим в вышележащих слоях возникают сжимающие остаточные напряжения, а в нижележащих — растягивающие (рис. 2).

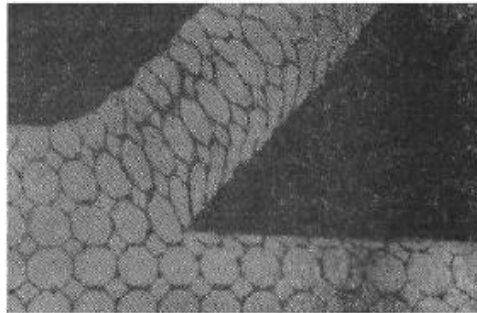


Рис. 2. Поверхностная деформация поверхностного слоя при резании

Второй причиной возникновения остаточных напряжений при механической обработке, особенно на высоких скоростях резания, является теплота, образующаяся в результате трения и пластических деформаций. Разогретые верхние слои металла стремятся расшириться, однако им препятствуют менее нагретые нижележащие слои, в результате чего в разогретых слоях возникают временные напряжения сжатия. Когда процесс резания завершается, верхние слои остывают быстрее нижних и перестают сжиматься (рис. 3).

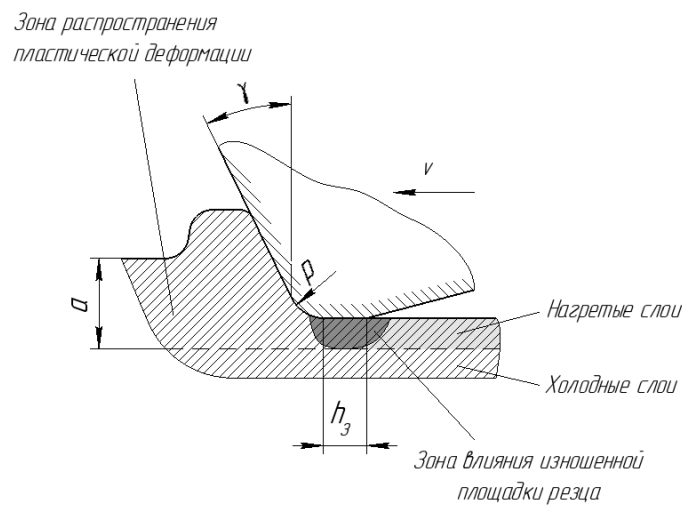


Рис. 3. Распределения теплоты в поверхностном слое при резании

Однако нижние слои продолжают еще некоторое время уменьшаться в объеме и утягивают за собой верхние слои. В связи с этим происходит перераспределение напряжений и в вышележащих слоях возникают растягивающие напряжения, а в нижележащих сжимающие.

Третьей причиной служит высокий местный нагрев при обработке материалов на высоких скоростях резания. В результате этого нагрева возникают не только пластические деформации и тепловые явления, но и фазовые превращения. Это означает, что на разном расстоянии от поверхности формируются разная структура материала. Из-за этого происходят неравные объемные измене-

ния поверхностных слоев, а также появляются остаточные напряжения разного знака. Например, распад мартенсита и образование тростита приводят к возникновению остаточных растягивающих напряжений. Это происходит из-за того, что у тростита меньший удельный объем. Распад аустенита и возникновение мартенсита может вызвать сжимающие остаточные напряжения, поскольку удельный объем мартенсита больше.

Вывод. На основании проделанной работы можно сделать вывод, что при обработке резанием на возникновение остаточных напряжений влияет три фактора: силовой, температурный и фазовые превращения. Возникающие при этом напряжения имеют разный знак и разное значение. В результате наложения всех этих напряжений суммарное их значение и знак являются непостоянными и зависят, в частности, от определенного перечня технологических факторов и их значений в конкретных условиях.

Литература

- [1] Блюменштейн В.Ю. Научные основы технологии машиностроения. Кемерово, КузГТУ, 2011.
- [2] Брылев А.В. Анализ вариантов обработки сложнопрофильной поверхности детали типа тела вращения на примере колесной пары. *Инженерный вестник*, 2012, № 11. URL: <http://ainjournal.ru/doc/513889.html>
- [3] Брылев А.В. Погрешность формы тонкостенной заготовки при закреплении. *Главный механик*, 2015, № 10, с. 30–34.
- [4] Яковлева А.П., Наумов В.А., Шарапов С.Н. и др. Причины разрушения зубчатых колес. *Главный механик*, 2017, № 1, с. 43–48.
- [5] Федорова Л.В., Федоров С.К., Гамидов А.Г. и др. Влияние электромеханической поверхностной закалки на изменение структуры и микротвердости сплава нирезист. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2018, № 3, с. 106–110.
- [6] Яковлева А.П. Управление свойствами поверхностных слоев деталей методом комбинированной обработки. *Справочник. Инженерный журнал*, 2020, № 4, с. 27–30.
- [7] Якобсон М.О. Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке. М., Машгиз, 1956.
- [8] Годерзиан К.К. Внутренние напряжения в металлах и сплавах, методы их измерения и устранения. М., ЦИИН цветной металлургии, 1962.
- [9] Биргер И.А. Остаточные напряжения. М., Машгиз, 1963.
- [10] Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М., Ленинград, Машгиз, 1956.
- [11] Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2015.
- [12] Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М., Металлургия, 1989.
- [13] Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М., Металлургия, 1970.
- [14] Колмогоров Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь, ПНИПУ, 2012.
- [15] Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания, М., Машиностроение, 1976.

- [16] Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчеты методом расчленения тела. М., Машгиз, 1963.
- [17] Метелев Б.А., Тудакова Н.М., Куликова Е.А. Основы технологии машиностроения. Ч. 1. Комплекс учебно-методических материалов. Нижний Новгород, НГТУ, 2006.

Чудина Анастасия Андреевна — студент кафедры «Технология машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Савельева Любовь Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чудина А.А. Причины возникновения остаточных напряжений при механической обработке поверхностей заготовки. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-662>

REASONS FOR THE OCCURRENCE OF RESIDUAL STRESSES DURING MACHINING OF WORKPIECE SURFACES

A.A. Chudina

a.a.volod@yandex.ru

SPIN-code: 2464-8227

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers basic information about residual stresses and a classification of residual stresses arising in the surface layer of parts. The main reasons for the occurrence of residual stresses are analyzed and the factors influencing them are established. It is concluded that the residual stresses on the part surface after machining with a blade tool can be caused by three main reasons: uneven plastic deformations in the cutting zone because of the force action of the tool on the workpiece, high temperatures accompanying the cutting process, and structural-phase transformations occurring on the surface of the workpiece. The results of the work can be further used for a more detailed study of the factors influence degree on the nature and value of residual stresses arising in the surface layer of the part after machining with a blade tool.

Keywords

Residual stresses, causes of occurrence, technological factors, machining, performance, temperature, cutting force, tool, workpiece, surface layer

Received 07.12.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Blyumenshteyn V.Yu. Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya [Scientific fundamentals of machine building technology]. Kemerovo, KuzGTU, 2011 (in Russ.).
- [2] Brylev A.V. Analysis of processing variants for formed part surface like rotary body at the example of wheel pair. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2012, no. 11. URL: <http://ainjournal.ru/doc/513889.html> (in Russ.).
- [3] Brylev A.V. Shape error in thin-walled blank during fixation. *Glavnyy mekhanik* [Chief Mechanical Engineer], 2015, no. 10, pp. 30–34 (in Russ.).
- [4] Yakovleva A.P., Naumov V.A., Sharapov S.N., et al. Causes of gear wheels damage. *Glavnyy mekhanik* [Chief Mechanical Engineer], 2017, no. 1, pp. 43–48 (in Russ.).
- [5] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Gamidov A.G., et al. Effect of electromechanical surface hardening on the changing of structure and microhardness of the niresist alloy. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2018, no. 3, pp. 106–110 (in Russ.).
- [6] Yakovleva A.P. Controlling the properties of the surface layers of parts by combined processing. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal with Appendix], 2020, no. 4, pp. 27–30 (in Russ.).
- [7] Yakobson M.O. Sherokhovatost', naklep i ostatochnye napryazheniya pri mekhanicheskoy obrabotke [Roughness, cold work and residual deformation at mechnical treatment]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956 (in Russ.).

-
- [8] Goderzian K.K. Vnutrennie napryazheniya v metallakh i splavakh, metody ikh izmereniya i ustraneniya [Inner stress in metals and alloys and methods for their measuring and elimination]. Moscow, TsIIN tsvetnoy metallurgii Publ., 1962 (in Russ.).
- [9] Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stress]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963 (in Russ.).
- [10] Matalin A.A. Kachestvo poverkhnosti i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin [Surface quality and exploitation properties of machine parts]. Moscow, Leningrad, Mashgiz Publ., 1956 (in Russ.).
- [11] Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduktii [Residual stress in metal products]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2015 (in Russ.).
- [12] Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh [Handling with residual stress in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989 (in Russ.).
- [13] Kolmogorov V.L. Napryazheniya, deformatsii, razrushenie [Stress, deformation, destruction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970 (in Russ.).
- [14] Kolmogorov G.L. Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i ikh vliyanie na dolgovechnost' i nadezhnost' metalloizdeliy [Technological residual stress and its effect on durability and reliability of metal products]. Perm', PNIPU Publ., 2012 (in Russ.).
- [15] Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya [Optimization of cutting process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976 (in Russ.).
- [16] Abramov V.V. Ostatochnye napryazheniya i deformatsii v metallakh. Raschety metodom raschleneniya tela [Residual stress and deformation in metals. Calculation using body separation method]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963 (in Russ.).
- [17] Metelev B.A., Tudakova N.M., Kulikova E.A. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya. Ch. 1. Kompleks uchebno-metodicheskikh materialov [Fundamentals of machine building technology. P. 1. Set of educational and methodological materials]. Nizhnyy Novgorod, NGTU Publ., 2006 (in Russ.).

Chudina A.A. — Student, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Savelyeva L.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Chudina A.A. Reasons for the occurrence of residual stresses during machining of workpiece surfaces. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-662.html> (in Russ.).