

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

Е.Н. Черковский

ev.cherkovskiy@gmail.com

SPIN-код: 9372-9883

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

Аннотация

Деформирующее резание является современным методом поверхностной пластической деформации материала. К настоящему времени было проведено достаточно много исследований, посвященных термической обработке деталей после деформирующего резания, однако сочетание такого метода поверхностной обработки материала с последующей химико-термической обработкой исследованы в существенно меньшей степени. В работе представлены результаты исследований стали 20Х после деформирующего резания и последующей химико-термической и термической обработки. Приведены результаты исследований структуры оребренных поверхностей после вакуумной цементации, вакуумного азотирования и жидкостного борирования. Исследована глубина проникновения насыщающих элементов в межреберные зазоры при химико-термической обработке различными методами.

Ключевые слова

Деформирующее резание, вакуумная цементация, вакуумное азотирование, жидкостное борирование, закалка с повторного нагрева, низкий отпуск, диффузионный слой, многокоординатная диффузия

Поступила в редакцию 07.12.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Деформирующее резание (ДР) представляет собой метод поверхностной пластической деформации материала в целях создания регулярного макрорельефа в виде чередующихся выступов и впадин [1, 2]. С помощью такой обработки в результате деформационного упрочнения и образования развитой поверхности могут быть улучшены важные свойства материала, такие как поверхностная твердость, интенсивность теплоотвода, адгезия к покрытиям [3-6]. Тем не менее нарушение целостности поверхности может приводить к уменьшению износостойкости: несмотря на наклеп и возможность реализации более эффективного смазывания, ребра как макрошероховатость способствуют уменьшению фактической площади контакта пары трения, что приводит к повышению контактных напряжений; возникает риск разрушения ребер с образованием абразивных частиц, увеличивающих интенсивность изнашивания. Эффективным технологическим методом повышения износостойкости, контактной и изгибной выносливости является термическая и химико-термическая обработка (ХТО) [7-11]. Цель данной работы — исследование влияния ДР поверхности материала на структурообразование при проведении ХТО различных видов.

Материал и методики исследований. Исследовали диффузионные слои после ХТО на образцах стали 20Х. До ХТО образцы подвергали нормализации с температуры 870 °С.

Вакуумную цементацию проводили при температуре 940 °С в течение 2 ч в универсальной вакуумной установке в атмосфере ацетилена при его циклической подаче. Давление насыщающего газа составляло 6 мм рт. ст. После этого выполняли либо нормализацию с температуры цементации в камере вакуумной печи в атмосфере азота при давлении около 80 мм рт. ст., либо закалку с повторным нагревом в карбюризаторе до температуры ниже температуры цементации (830 °С) с последующим отпуском при температуре 190 °С. В качестве охлаждающей среды использовали водный раствор полимера Акресол (30 %) [12].

Вакуумному азотированию подвергали образцы в универсальной вакуумной установке в атмосфере аммиака с постоянной подачей насыщающей среды в течение 8 ч. Давление активного газа составляло 82 мм рт. ст.

Жидкостное борирование осуществляли в расплаве борсодержащих солей безэлектродным методом [13] при температуре 850 °С в течение 3,5 ч. После жидкостного борирования выполняли два вида термической обработки непосредственно после насыщения бором: нормализацию на воздухе или закалку в масле с последующим низким отпуском (190 °С). Повторный нагрев после борирования перед термической обработкой не проводили.

Для микрофотосъемки использовали шлифы, приготовленные по общепринятой методике, и оптический микроскоп Olympus GX-51. Съемку выполняли при увеличении от $\times 50$ до $\times 1000$.

Результаты исследований и их обсуждение. На плоских поверхностях после вакуумной цементации и последующей термической обработки образуются типичные структуры (рис. 1).

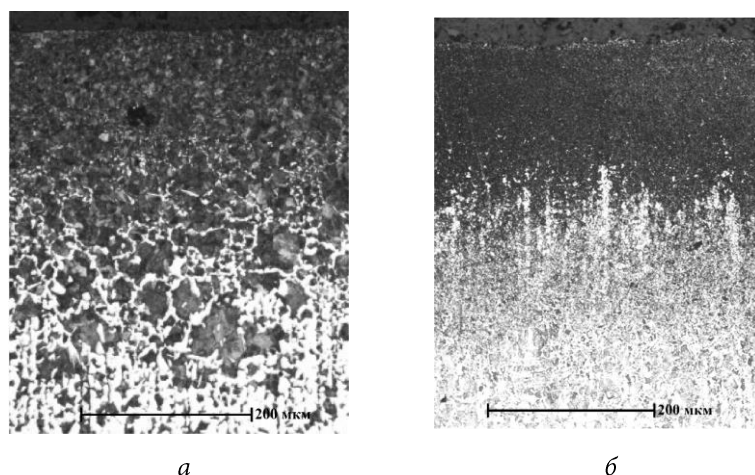


Рис. 1. Микроструктура на плоских участках образцов из стали 20Х после вакуумной цементации при температуре 940 °С в течение 2 ч с последующей нормализацией (а) и закалкой от температуры 830 °С и низким отпуском при температуре 190 °С (б), $\times 50$

Нормализованная структура состоит из перлита и феррита, причем перлитные колонии достигают существенных размеров (рис. 1, *a*). Эффективная толщина диффузионного слоя составляет 350 мкм. Вследствие трехкратной перекристаллизации при обработке, включающей цементацию и закалку с повторным нагревом в карбюризаторе, зафиксировано существенное измельчение зерен (рис. 1, *б*) по сравнению с нормализованной структурой.

На плоской поверхности стали при вакуумной цементации не образуются карбиды цементитного типа, однако на оребренной поверхности цементит присутствует, что свидетельствует о повышении эффективности массопереноса через развитую поверхность (рис. 2, 3).

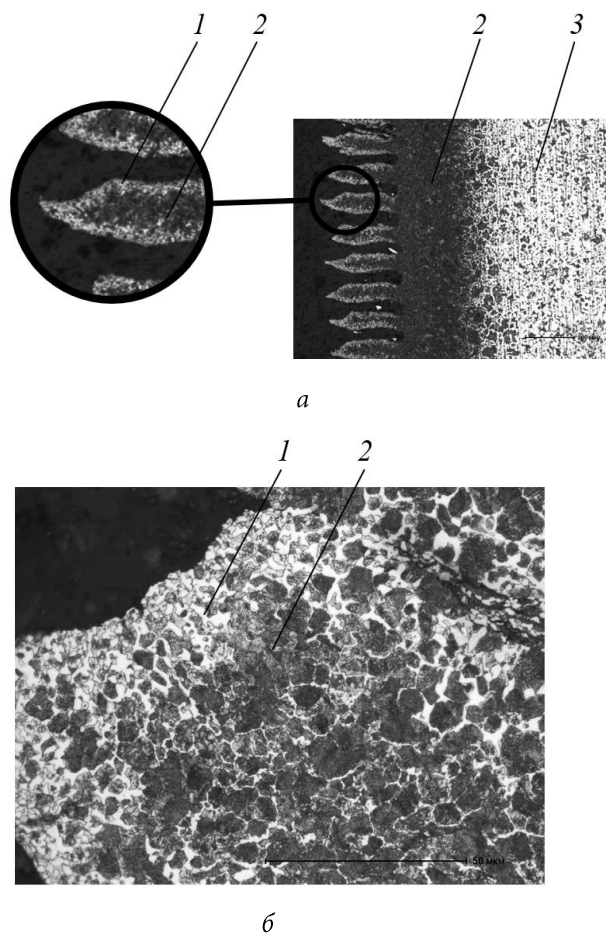


Рис. 2. Структура оребренной поверхности, $\times 50$ (*a*), и тела ребра, $\times 500$ (*б*), после вакуумной цементации при температуре 940°C в течение 2 ч с нормализацией в камере от температуры химико-термической обработки:

1 — цементит; 2 — перлит; 3 — перлит и феррит

Цементит на поверхности ребер образует более толстый слой из-за большей концентрации углерода, а в теле ребра формирует сетку по границам зерен (см. рис. 2, *б*). Образование избыточных карбидов цементитного типа свиде-

тельствует о достижении высокой концентрации углерода на поверхности материала и об ускорении массопереноса через развитую поверхность ребренной структуры в сравнении с плоской поверхностью. О правильности последнего утверждения свидетельствует также и то, что эффективная толщина диффузионного слоя увеличилась до 650 мкм — следовательно, скорость процесса ХТО увеличилась примерно в два раза.

При проведении после вакуумной цементации закалки с низким отпуском происходит мартенситное превращение, ведущее к формированию структур, эффективно упрочняющих материал (см. рис. 3).

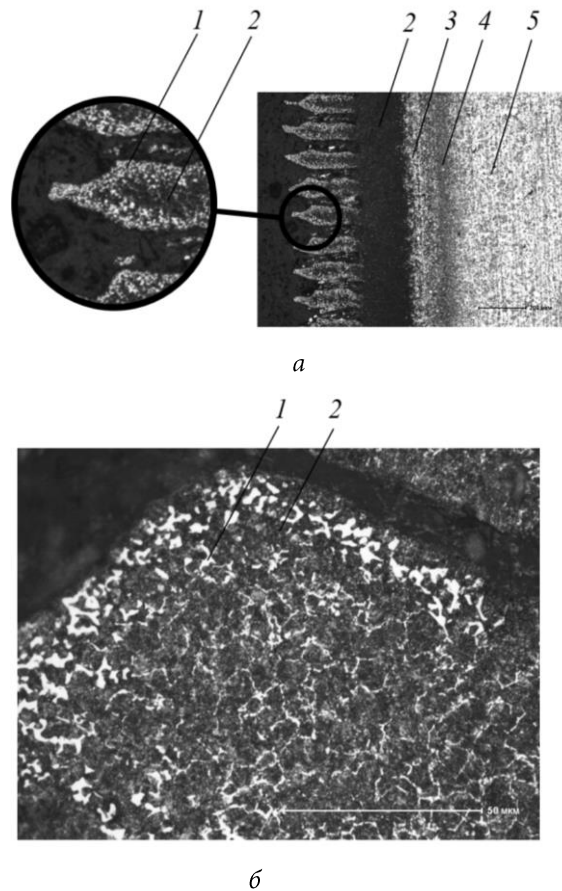


Рис. 3. Структура ребренной поверхности, $\times 50$ (а), и тела ребра, $\times 500$ (б), после вакуумной цементации при температуре $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч, закалки с температуры $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ и низкого отпуска при температуре $190\text{ }^{\circ}\text{C}$:

- 1 — цементит; 2 — высокоуглеродистый мартенсит; 3 — остаточный аустенит и высокоуглеродистый мартенсит; 4 — низкоуглеродистый мартенсит; 5 — низкоуглеродистый мартенсит и феррит

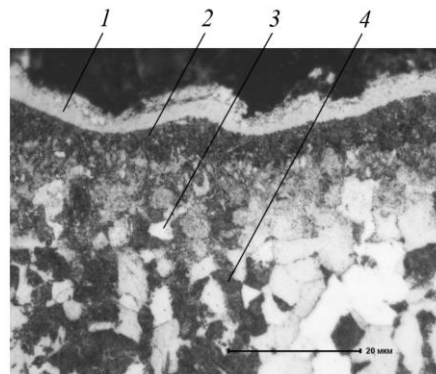
На поверхности ребер образуются карбиды цементитного типа 1, далее следует высокоуглеродистый мартенсит 2, концентрация углерода в котором постепенно снижается по мере отдаления от поверхности. Наблюдается зона с по-

вышенным количеством остаточного аустенита 3 при переходе от высокоуглеродистого игольчатого мартенсита к низкоуглеродистому речечному. Это связано с перераспределением хрома, стабилизирующего аустенит, и градиентом концентрации углерода от поверхности к сердцевине: хром оттесняется от поверхности, поэтому на поверхности наблюдается высокоуглеродистый игольчатый мартенсит, затем следует зона с повышенной концентрацией хрома (вследствие оттеснения), в которой количество остаточного аустенита выше; под этой областью концентрация хрома возвращается к исходному значению, но содержание углерода еще выше 0,2 % из-за диффузионного насыщения — образуется речечный мартенсит 4, содержание которого уменьшается к сердцевине стали до смеси мартенсита и феррита 5. Феррит в сердцевине наблюдается вследствие того, что закалку проводили неполную, из межкритического интервала температур A_1 - A_3 . Закалка с повторного нагрева в карбюризаторе до температуры более низкой, чем температура ХТО, позволяет получить в структуре больше цементита, чем после вакуумной цементации с последующей нормализацией, о чем свидетельствует большее количество карбидов цементитного типа в приповерхностном слое в закаленной структуре.

В отличие от углерода, обладающего при температуре цементации высокой диффузионной подвижностью в стали, азот насыщает поверхность значительно медленнее, главным образом из-за меньшей температуры процесса. Структура диффузионного слоя на неоребренной поверхности после азотирования представлена на рис. 4.

Рис. 4. Структура поверхностного слоя стали 20X после вакуумного азотирования при температуре 540 °С в течение 8 ч, $\times 1000$:

1 — нитрид железа с большой зоной гомогенности $Fe_{2-3}N$ (ϵ -фаза); 2 — эвтектоидная смесь азотистого феррита и нитрида железа Fe_4N ($\alpha + \gamma$);
3 — феррит; 4 — перлит



На поверхности стали образуется твердый слой нитрида железа малой толщины, под которым расположен эвтектоидный подслой. Толщина диффузионного слоя составляет 8 мкм.

Большого влияния на толщину диффузионного слоя оребрение не оказывает, однако у вершин ребер заметно утолщение эвтектоидной зоны в 3-4 раза вследствие многокоординатной диффузии (рис. 5).

Толщина диффузионного слоя в ребре по направлению нормали к его поверхности составила 10 мкм, а следовательно, увеличилась на 25 % в результате увеличения количества дефектов в структуре после ДР. Упрочненные слои, однако, расположены перпендикулярно поверхности детали, а значит, толщина

упрочненной зоны при сочетании ДР и вакуумного азотирования увеличивает-ся, как и при цементации, на высоту ребра. Целиком же можно рассматривать полученную поверхностную структуру как чередующиеся прослойки высоко-твердых нитридов и более мягкие прослойки сердцевин ребер. Такая структура соответствует правилу Шарпи и должна способствовать повышению износо-стойкости.

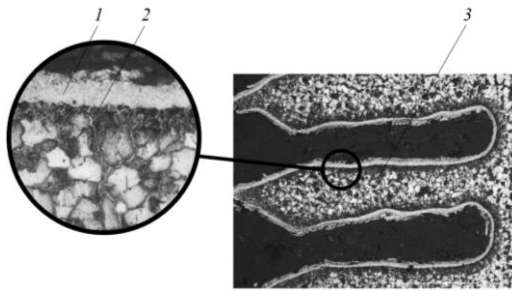


Рис. 5. Структура оребренной поверх-ности после вакуумного азотирования при температуре 540 °С в течение 8 ч:
1 — нитрид железа; 2 — эвтектоидная смесь феррита и нитрида железа;
3 — ферритно-перлитная смесь, ×200

Обнаружена тенденция к образованию сетки нитридов по границам зерен ферритно-перлитной смеси — скорее всего, ее появление обусловлено пласти-ческой деформацией поверхности при нарезании ребер, которая увеличивает количество дефектов и ускоряет массоперенос.

Структуры борированных слоев на плоских поверхностях представлены на рис. 6.

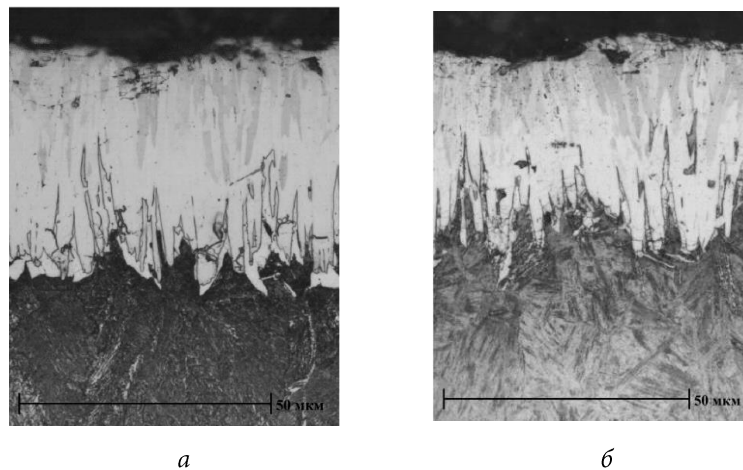


Рис. 6. Структура борированного при температуре 850 °С в течение 3,5 ч плоского образца, ×500:

a — после нормализации с температуры борирования; *б* — после закалки с температуры борирования и низкого отпуска (температура 190 °С)

Бориды в составе диффузионного слоя различаются стехиометрическими коэффициентами: FeB, Fe₂B и Fe₃B [14]. Твердость этих боридов последователь-но уменьшается.

Термическая обработка после борирования не оказывает значительного влияния на полученные борированные слои. В среднем толщина боридного слоя на плоских образцах составляет 30 мкм и 35 мкм для закаленной и нормализованной структур соответственно. При борировании легирующие элементы, в том числе и углерод, оттесняются в зону под боридами; после нормализации под зоной боридов образуется перлит с малым количеством феррита (рис. 6, а), а после закалки в этой зоне формируется реечный мартенсит с весьма длинными иглами, что определяется отсутствием дополнительных перекристаллизаций и измельчения зерна при закалке непосредственно с температуры борирования (рис. 6, б).

Склонности к росту толщины диффузионного слоя поперек ребра в случае жидкостного борирования поверхностей после оребрения не выявлено, однако, как и в случае с вакуумным азотированием, важным является перпендикулярное расположение сверхтвердых боридных прослоек по отношению к поверхности детали, за счет чего фактическая толщина упрочненного слоя увеличивается на высоту ребра. Структура оребренной поверхности после жидкостного борирования и нормализации представлена на рис. 7.

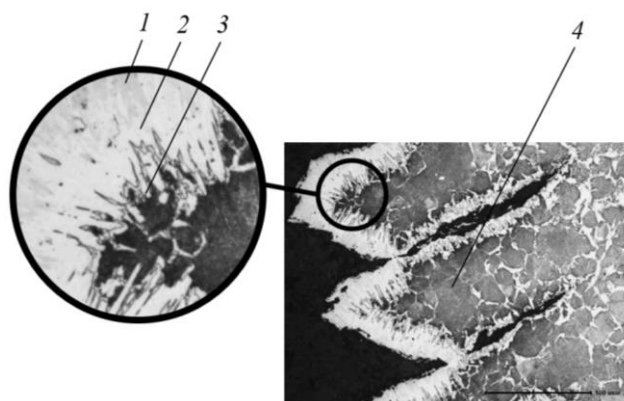


Рис. 7. Структура оребренной поверхности после жидкостного борирования при температуре 850 °С в течение 3,5 ч и нормализации с температуры борирования:

1 — FeB; 2 — Fe₂B; 3 — Fe₃B; 4 — феррит и перлит: ×200

Боридный слой между ребер значительно тоньше, чем у их вершин, что свидетельствует о сложности насыщения жидкостным методом периодической макроструктуры: насыщающая бором жидкая среда обладает слишком большой вязкостью, вследствие чего не может полностью заполнить межреберные зазоры, что приводит к снижению эффективности обработки. Однако для ребер, нарезанных перпендикулярно к поверхности с зазором, что облегчает внешний массоперенос, такая структура позволяет реализовать принцип Шарпи: высокотвердые прослойки боридов в сочетании с более мягкой матрицей обуславливают высокую износостойкость приповерхностного слоя материала. Таким образом создается своеобразная композиционная структура, ведущая к улучшению эксплуатационных свойств деталей из стали (рис. 8).

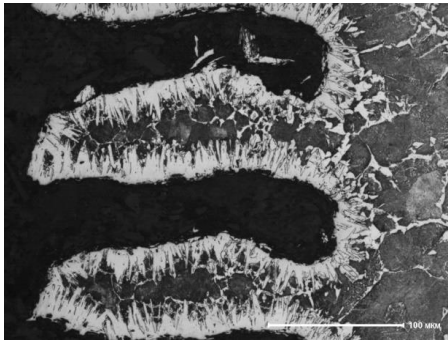


Рис. 8. Структура оребренной поверхности после жидкостного борирования при температуре 850 °С в течение 3,5 ч и нормализации с температуры борирования (ребра с зазором перпендикулярны поверхности детали), $\times 200$

При проведении закалки после борирования основной фазой является речный мартенсит 3, иглы которого достаточно длинны, что объясняется крупнозернистой структурой в высокотемпературном состоянии (рис. 9). Боридный слой состоит боридов FeB и Fe₂B, боридов Fe₃B визуально не заметно вследствие быстрой скорости охлаждения. По сравнению с нормализованной структурой толщина диффузионного слоя меньше как раз из-за отсутствия боридов Fe₃B.

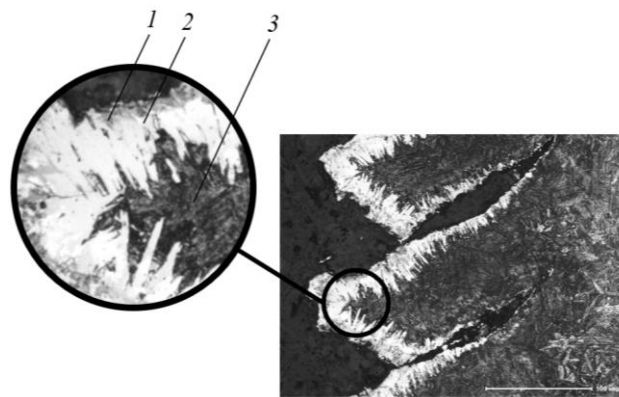


Рис. 9. Структура оребренной поверхности после жидкостного борирования при температуре 850 °С в течение 3,5 ч, закалки в масле с температуры борирования и низкого отпуска при температуре 190 °С, $\times 200$:

1 — FeB; 2 — Fe₂B; 3 — мартенсит

Можно заключить, что ДР в сочетании с жидкостным борированием следует использовать только в целях повышения износостойкости материала для реализации правила Шарпи, а также для повышения абразивной износостойкости ввиду очень высокой твердости боридов. Оребрение затрудняет доступ жидкой борлирующей среды к поверхности, что уменьшает эффективность насыщения по мере приближения к впадинам ребер, поэтому для жидкостного борирования рекомендуются оребренные структуры с достаточными зазорами.

Выводы. По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Деформирующее резание формирует развитую поверхность и повышенное количество дефектов кристаллического строения (дислокации и границы

зерен в первую очередь), что способствует повышению эффективности последующей ХТО.

2. Вакуумная цементация позволяет увеличить толщину диффузионного слоя примерно в 2 раза вследствие многокоординатной диффузии.

3. Вакуумное азотирование и жидкостное борирование дает возможность увеличить на 25 % толщину диффузионного слоя на боковых поверхностях ребер вследствие повышенного количества дефектов, сформированных в процессе предварительного деформирующего резания.

4. Жидкостное борирование следует проводить для оребренных структур с достаточными зазорами, чтоб исключить утонение диффузионного слоя у впадин вследствие затрудненного доступа насыщающего расплава солей.

5. Вакуумное азотирование и жидкостное борирование позволяет создать поверхностную структуру, соответствующую правилу Шарпи (чередование твердых насыщенных прослоек поверхностей ребер с их более мягкими сердцевинами) и повышающую износостойкость.

Литература

- [1] Зубков Н.Н., Овчинников А.И. Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации. Патент РФ 2044606. Заявл. 30.04.1993, опубл. 27.09.1995.
- [2] Зубков Н.Н. Ремонт, восстановление и модернизация на основе метода деформирующего резания. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2003, № 10, с. 7–11.
- [3] Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Васильев С.Г. и др. Основы метода деформирующего резания. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
- [4] Шуляк Я.И. Особенности деформационного упрочнения поверхностного слоя деталей методом деформирующего резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 3, с. 3–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-3-3-10>
- [5] Васильев С.Г., Попцов В.В. Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием методом деформирующего резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 12, с. 37–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-37-43>
- [6] Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 11, с. 77–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-11-77-82>
- [7] Дегтярева А.Г., Симонов В.Н., Бокатенко Е.Ю. Влияние предварительной термической обработки стали 40Х на структуру и свойства поверхности, упрочненной деформирующим резанием. *Инженерный вестник*, 2017, № 6. URL: <http://ainjournal.ru/doc/859951.html>
- [8] Дегтярева А.Г., Попцов В.В., Симонов В.Н. и др. Формирование закаленных структур в стали 35 методом деформирующего резания. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/725672.html>
- [9] Кельциева И.А., Васильев С.Г. Химико-термическая обработка модифицированных поверхностных структур на титановых сплавах. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2016, № 4, с. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.7463/aplts.0416.0845347>

- [10] Овчинников А.И., Васильев С.Г., Хасянов М.А. и др. Патент РФ 2015202. Способ упрочнения поверхности детали. Заявл. 04.02.1192, опубл. 30.06.1994.
- [11] Васильев С.Г., Зубков Н.Н., Симонов В.Н. Упрочняющие композиционные покрытия с вертикальным расположением упрочняющих слоев. *Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. Сб. мат. Межд. науч.-практ. конф.* М., Диона, 2019, с. 119–129.
- [12] Горюшин В.В., Петропавловский А.Г., Шевченко С.Ю. и др. Новая полимерная закалочная среда Акресол. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2008, № 4, с. 49–52.
- [13] Красуля А.А., Помельникова А.С., Цих С.Г. Оптимизация режимов низкотемпературного жидкостного борирования с целью получения рациональных структур поверхностного слоя и сердцевины стали 30ХГСА. *Мат. XXIV Уральской школы металлослов-термистов*. Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 2018, с. 133–135.
- [14] Винтайкин Б.Е., Камынин А.В., Смирнов А.Е. и др. Особенности формирования поверхностных фаз при химико-термической обработке сплавов на основе железа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2018, № 2, с. 73–81. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-73-81>

Черковский Евгений Николаевич — студент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Смирнов Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Черковский Е.Н. Химико-термическая обработка оребренных поверхностных структур, полученных методом деформирующего резания. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-661>

CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF RIBBED SURFACE STRUCTURES OBTAINED BY DEFORMING CUTTING

E.N. Cherkovskiy

ev.cherkovskiy@gmail.com

SPIN-code: 9372-9883

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Deforming cutting is a modern method of surface plastic deformation of a material. To date, a lot of studies have been carried out on the heat treatment of parts after deforming cutting, however, the combination of this method of material surface treatment with subsequent chemical-thermal treatment has been studied to a much lesser extent. The paper presents the results of studies of steel 20H after deforming cutting and subsequent chemical-thermal and heat treatment. The results of studies are presented of ribbed surfaces structure after vacuum carburizing, vacuum nitriding and liquid boriding. The depth of saturating elements penetration into intercostal gaps during chemical-thermal treatment by various methods has been investigated.

Keywords

Deforming cutting, vacuum carburizing, vacuum nitriding, liquid boriding, reheat quenching, low tempering, diffusion layer, multi-axis diffusion

Received 07.12.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. Sposob polucheniya poverkhnostey s chereduyushchimisya vystupami i vpadinami i instrument dlya ego realizatsii [Method for intermittent land surface production and instrument for its realization]. Patent RU 2044606. Appl. 30.04.1993, publ. 27.09.1995 (in Russ.).
- [2] Zubkov N.N. Repair, reconditioning and modernization based on deforming cutting method. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2003, no. 10, pp. 7–11 (in Russ.).
- [3] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'yev S.G., et al. Osnovy metoda deformiruyushchego rezaniya [Fundamentals of deforming cutting method]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005 (in Russ.).
- [4] Shulyak Ya.I. Peculiarities of the strain hardening of surface layers of parts by deformational cutting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2015, no. 3, pp. 3–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-3-3-10> (in Russ.).
- [5] Vasil'yev S.G., Poptsov V.V. Increasing a workpiece surface hardness by thermal effect using macrodeformation process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 12, pp. 37–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-37-43> (in Russ.).
- [6] Vasil'yev S.G., Shulyak Ya.I. Change of hardness of a surface of a detail by a machining method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 11, pp. 77–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-11-77-82> (in Russ.).

- [7] Degtyareva A.G., Simonov V.N., Bokatenko E.Yu. Effect of thermal pretreatment of 40Kh steel on structure and properties surface hardened by deformation cutting. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2017, no. 6. URL: <http://ainjournal.ru/doc/859951.html> (in Russ.).
- [8] Degtyareva A.G., Poptsov V.V., Simonov V.N., et al Formation of quenching structures in the steel 35 by deform cutting. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/725672.html> (in Russ.).
- [9] Kel'tsieva I.A., Vasil'yev S.G. Chemical heat treatment of modified titanium alloy surface structures. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2016, no. 4, pp. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.7463/aplts.0416.0845347> (in Russ.).
- [10] Ovchinnikov A.I., Vasil'yev S.G., Khasyanov M.A., et al. Sposob uprochneniya poverkhnosti detail [Method for surface hardening]. Patent RU 2015202. Appl. 04.02.1192, publ. 30.06.1994 (in Russ.).
- [11] Vasil'yev S.G., Zubkov N.N., Simonov V.N. [Hardening composite coatings with vertical placing of hardening layers]. *Klyuchevye trendy v kompozitakh: nauka i tekhnologii*. Sb. mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf. [Key Trends in Composites: Science and Technologies. Proc. Int. Sci. Pract. Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2019, pp. 119–129 (in Russ.).
- [12] Goryushin V.V., Petropavlovskiy A.G., Shevchenko S.Yu., et al. Akresol: a new polymer quenchant. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2008, no. 4, pp. 49–52. (in Russ.). (Eng. version: *Met Sci Heat Treat.*, 2008, vol. 50, no. 3-4, pp. 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-008-9025-4>)
- [13] Krasulya A.A., Pomel'nikova A.S., Tsikh S.G. [Optimization of low-temperature liquid boriding regimes in order to achieve rational structures of surface layer and center of 30KhGSA steel]. *Mat. XXIV Ural'skoy shkoly metallovedov-termistov* [Proc. XXIV Ural School for metallographists heat treaters]. Magnitogorsk, MGTU im. G.I. Nosova Publ., 2018, pp. 133–135 (in Russ.).
- [14] Vintaykin B.E., Kamynin A.V., Smirnov A.E., et al. Specific features of forming surface phases under chemical heat treatment of iron-base alloys. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 2, pp. 73–81. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-73-81> (in Russ.).

Cherkovskiy E.N. — Student, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Smirnov A.E., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Cherkovskiy E.N. Chemical-thermal treatment of ribbed surface structures obtained by deforming cutting. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-661.html> (in Russ.).