

УДК 669.14.018:621.78

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.44

РОЛЬ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ В ПОВЫШЕНИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Дощечкина И.В., Семенчук В.Р.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

Аннотация. Изучено влияние комбинированных методов воздействия на поверхность (разные виды механической обработки, цементация, дробеструйный наклёп), а также бомбардировки низкоэнергетическими ионами на усталостную прочность изделий. Установлено повышение предела выносливости на 40 % при шлифовании поверхности до цементации, а не после. Показано, что ионная бомбардировка тонкого поверхностного слоя увеличивает долговечность изделий в 1,5 раза.

Ключевые слова: усталостная прочность, механическая обработка, дробеструйный наклёп, ионная бомбардировка, шероховатость поверхности, субструктура, предел выносливости.

Вступ

Академик К.С. Колесников отмечает, что «качество машин заложено в поверхностном слое детали». Как известно, любое внешнее воздействие (химическое, тепловое, механическое, радиационное и др.) на материал детали происходит через её поверхность, поэтому большинство деструктивных процессов (усталость, абразивный износ, коррозия) начинаются в поверхностных слоях.

Состояние поверхности существенно влияет на объёмные механические свойства изделий и, в первую очередь, на сопротивление усталостному разрушению, поскольку зарождение усталостной трещины происходит на поверхности, или вблизи поверхности.

В связи с усложнением современных конструкций, режимов эксплуатации, интенсификацией рабочих процессов способность изделия сопротивляться усталостному разрушению приобретает особое значение. Надо подчеркнуть, что усталость развивается при напряжениях ниже предела текучести материала и приводит к уменьшению эксплуатационной стойкости. Это подтверждается статистикой – более 80 % отказов деталей машин происходят вследствие разрушений из-за развития процессов усталости. Следовательно, решение вопроса возможности повышения усталостной прочности является актуальным.

Анализ публикаций

Усталостные повреждения локальны, не сопровождаются какими-либо видимыми эффектами и поэтому особенно опасны.

Основной показатель усталостной прочности – предел выносливости – сильно зави-

сит от шероховатости поверхностного слоя, наличия в нём микротрещин, их размера. Так как при повторно-силовых напряжениях начало разрушения связано с образованием поверхностной трещины, совершенно очевидно, что с уменьшением шероховатости поверхности сопротивление усталости возрастает.

Качество поверхности определяется микрогеометрией неровностей, знаком напряжений, химическим составом, размером зерна, структурными изменениями, происходящими в процессе обработки деталей.

Согласно работе [1] предел выносливости образцов из малопрочной стали, поверхность которых не обрабатывали после прокатки, составляет 70 % от предела выносливости тонко полированных образцов. Для высокопрочной стали, более чувствительной к местным напряжениям, это соотношение существенно меньше и составляет лишь 35 %.

Для повышения усталостной прочности широкой номенклатуры деталей машин широко используется поверхностная пластическая деформация (ППД). Авторами [2] убедительно показано, что ППД при помощи бойкового инструмента деталей из нормализованной стали 40Х приводит к повышению уровня сжимающих макронапряжений более чем в 6 раз. При этом долговечность увеличивается в ~ 5 раз.

При таких видах упрочняющей поверхностной обработки как цементация и азотирование на поверхности возникают значительные сжимающие напряжения, препятствующие зарождению усталостных трещин. В работе [3] отмечается, что в деталях после

цементации (с последующей закалкой и низким отпуском), в зависимости от концентрации углерода в упрочнённом слое, значение этих напряжений достигает 300–400 МПа. После азотирования они возрастают до 700–800 МПа. Как следствие, предел выносливости увеличивается в 1,3–1,5 раза соответственно.

К современным и эффективным методам обработки поверхностного слоя, кардинально изменяющим его структурно-напряжённое состояние и микрогеометрию, относятся ультразвуковая ударная обработка (УЗУО) и ионно-плазменные технологии (метод КИБ). Улучшение усталостных характеристик материала согласно [4–6] можно объяснить субмикро- и наноструктурированием тонкого поверхностного слоя, увеличением в нём плотности дефектов кристаллического строения и созданием сжимающих напряжений

В работе [4] установлено, что после ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) стали Ст3 образование в поверхностном слое субзернистой структуры, появление сжимающих макронапряжений привели к повышению предела выносливости на 50 %, а долговечность увеличилась на порядок. Авторы [6] отмечают существенное увеличение усталостной прочности после формирования на поверхности нанокристаллического слоя в результате ионной бомбардировки.

В работе [7] также установлено, что наноструктурирование поверхностного слоя повысило усталостную прочность высоколегированных сталей в 1,5–1,8 раза. Однако для стабилизации наноструктуры рекомендуется закрепить её химико-термической обработкой или ионной имплантацией. Учитывая нестабильность наноструктурного состояния, это очень сложно осуществить на практике.

Результаты работы [8] свидетельствуют о том, что ионная бомбардировка с обеспечением наноструктуры поверхности стальных изделий приводит лишь к очень незначительному повышению предела выносливости σ_{-1} (~5 %).

Дальнейшие исследования в этом инновационном направлении вызывают значительный интерес и, безусловно, своевременны.

Развитие положений о возможности залечивания несплошностей, возникающих в металле в процессе циклического нагружения, также является важным аспектом в решении проблемы повышения долговечности изделий.

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является повышение сопротивления усталости и долговечности изделий.

Задачи исследования – изучить влияние состояния поверхности после различных способов обработки на усталостную прочность, что позволит прогнозировать долговечность изделий,

Результаты исследований

Для исследования выбраны разные методы поверхностного воздействия – цементация, механическая обработка (шлифование и полирование), дробеструйная обработка (ППД) и ионная бомбардировка.

Исследовались цементируемая сталь 20Х2Н4А, улучшаемая сталь 40Х, рессорно-пружинная сталь 65Г.

Микроструктуру изучали на оптическом и растровом электронном микроскопах.

Напряжённое состояние поверхностного слоя определяли на дифрактометре ДРОН-3 в $K\alpha$ – Cr излучении.

Шероховатость и профиль поверхности оценивали с помощью профилометра-профилографа NR200.

Испытания на усталость выполняли на машине МУИ-6000 по схеме симметричного изгиба с вращением. База испытаний составляла 10^7 циклов нагружения. Образцы для испытаний были с укороченной за счёт переходных сечений рабочей частью, что позволило уменьшить коробление (не более 0,05 мм) и увеличить жёсткость.

Влияние различных видов механической обработки на предел выносливости и долговечность изделий из цементируемых сталей

Цементируемая сталь 25Х2Н4А, которая широко используется для крупных ответственных деталей, в частности, тяжелонагруженных шестерен, работающих при высоких переменных напряжениях и в условиях трения.

Режим цементации: температура 930 °С, выдержка – 10 час, подстуживание – до 820 °С, закалка в масле, низкий отпуск 180–200 °С, Эффективная толщина слоя 1,3–1,5 мм.

После цементации реализуется высокопрочное, хрупкое состояние поверхности, для которого показатели шероховатости особенно важны, поскольку даже незначительные неровности являются концентраторами напряжений и их релаксация происходит не за счёт локальных пластических деформаций, а за счёт возникновения микротрещин. Приняв к

сведению эти положения, поверхность образцов для испытаний на усталостную прочность была обработана по трём вариантам:

1. Точение с припуском под шлифовку на глубину 0,2 мм на сторону, ХТО (цементация + закалка + низкий отпуск), шлифование на глубину 0,2 мм.

2. Точение, шлифование, ХТО, полирование до номинального размера.

3. Точение, шлифование, ХТО, полирование, дробеструйная обработка.

Вариант 1 соответствует обычно применяемой на практике технологии изготовления шестерен. Но, как известно, в процессе шлифования в поверхностном слое после цементации вследствие фазовых превращений создаются остаточные напряжения растяжения и структурная неоднородность.

Вариант 2 исключает вредное действие остаточных напряжений от шлифовки, так как она производилась перед цементацией.

В варианте 3 преследовалась цель – оценить влияние ППД.

На рис. 2 приведены профили поверхности образцов после указанных вариантов обработки.

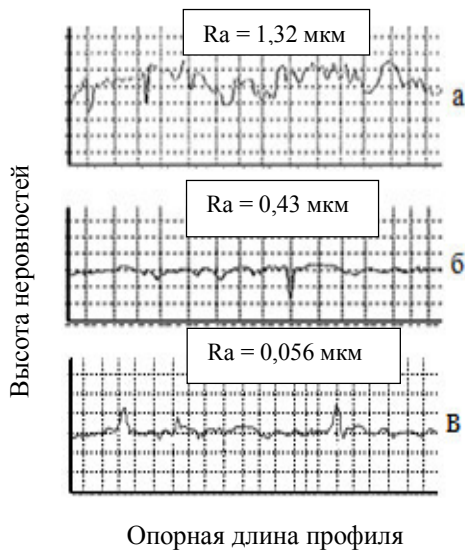


Рис. 1. Профили и шероховатость поверхности образцов после разных вариантов её обработки: а – шлифование; б – полирование; в – обработка дробью

Испытания на усталость выполняли на машине МУИ-6000 по схеме симметричного изгиба с вращением. База испытаний составляла 10^7 циклов нагружения.

По результатам испытаний построены усталостные кривые, приведенные на рис. 2.



Рис. 2. Усталостные кривые образцов из стали 25ХГМ после различных видов поверхностной обработки

В табл. 1 указаны значения пределов выносливости образцов, полученных после различных вариантов их поверхностной обработки.

Таблица 1 – Значения пределов выносливости испытанных вариантов образцов

№ варианта	Предел выносливости σ_{-1} , МПа	Повышение предела выносливости, %
1	630	100
2	890	141
3	990	157

*Вариант 1 принят за 100 %

Вид кривых на рис. 2 свидетельствует, что шлифовка до цементации и полирование после (вариант обработки 2) привели к существенному уменьшению шероховатости поверхности (рис. 1, б) и повышению предела выносливости на 41 %. Заметно увеличилась и долговечность образцов при перегрузках. На это указывает тот факт, что левая наклонная ветвь кривой варианта 2 расположена значительно правее, чем участок наклонной ветви кривой варианта 1 при одном и том же уровне напряжений.

Дробеструйная обработка поверхности повысила предел выносливости ещё на 16 % (до 57 %) и больше увеличила долговечность (вариант 3, рис. 2). Этот факт можно объяснить появлением зафиксированных нами внутренних остаточных напряжений сжатия (порядка – 550 МПа), а также практически полным уничтожением структурной неоднородности поверхности в процессе пластической деформации при наклёпе дробью. Кроме того, как известно, при ППД происходят позитивные изменения внутренней зеренной структуры (дробление блоков, увеличение плотности дислокаций), что способствует упрочнению поверхности. Образовавшиеся углубления от дроби (диаметр 0,8 мм) хотя и увеличивают её шероховатость, но из-за своей округлой формы и малого проникновения в очень твёрдую мартенситную структуру поверхности после ХТО не являются существенными концентраторами напряжений – очагами развития усталостной трещины. Проведенные испытания показали эффективность не только завершающей ППД, но и шлифования образцов до цементации. Кроме того, использование варианта 2 там, где это возможно, сокращает технологический процесс обработки поверхности.

Ионная бомбардировка как один из современных методов повышения циклической долговечности изделий

Эксперименты были выполнены на образцах из сталей 40Х и 65Г. Эти стали выбраны из практических соображений. Из стали 40Х изготавливают оси, шатуны, шестерни, валы, то есть детали, которые эксплуатируются при многократно повторяющихся циклических нагрузках. Сталь 60Г – рессорно-пружинная, а одно из основных требований к этим изделиям – высокая усталостная прочность.

Обработку усталостных образцов низкоэнергетическими (< 3 кэВ) ионами титана проводили на установке «Булат-3т» в атмосфере аргона, при давлении 0,133 Па, силе тока 95-100 А, напряжении 900–1100 В. Время обработки – 1,5 мин. Подбор параметров режима ионной бомбардировки (ИБ) предотвращал разогрев образца. Для равномерной обработки поверхности образцы вращались с помощью планетарного механизма.

Состояние поверхности образцов стали 40Х до и после ИБ, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, иллюстрирует рис. 3.

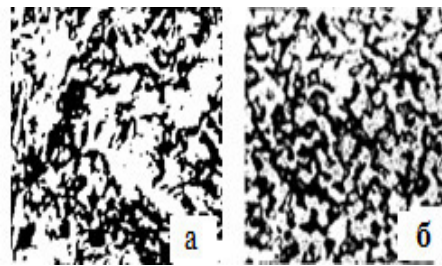


Рис. 3. Микроструктура образца из стали 40Х (зак. + выс. отпуск) до (а) и после (б) ИБ; x 10000

До бомбардировки размер зерна – 50 мкм, а после ИБ появляется развитая субструктура с широкими границами и размером зерен 600–800 нм. Именно такая специфическая структура обуславливает уникальный уровень свойств. Микроспектральный анализ показал отсутствие титана в поверхностном слое. Титан сосредоточен в отдельных каплях, оседающих на поверхности. Эти капли, попадая в места поверхностных неровностей и несплошностей (поры, впадины, микротрещины), «залечивают» их и уменьшают количество концентраторов напряжений. Несмотря на наличие капельной фазы титана и развитую субструктуру, шероховатость после ИБ очень существенно уменьшается (рис. 4), что свидетельствует о малой глубине рельефа поверхности.

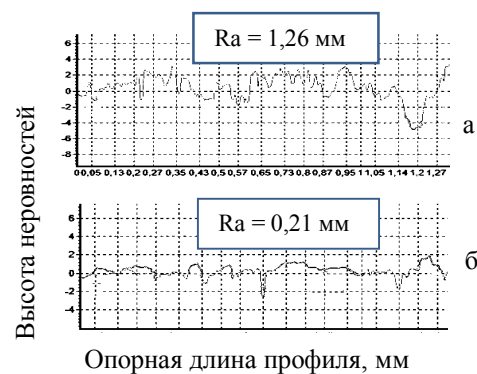


Рис. 4. Шероховатость поверхности образца до ИБ (а) и после (б)

Аналогичные структурные изменения произошли и в стали 65Г (зак.+ сред.отпуск) после ИБ.

Уменьшение шероховатости, «залечивание» поверхностных дефектов, существенное измельчение зерна и наличие развитой субструктуры в поверхностном слое не могли не сказаться на долговечности изделий.

Результаты испытаний на циклическую долговечность приведены в табл. 2. Для определения количества циклов до разруше-

ния образцов было выбрано напряжение 380 МПа. Как видно из таблицы, при таком напряжении образец из стали 40Х без ИБ разрушился после 297600 циклов, а после ИБ выдержал 1000000 циклов без разрушения. Увеличение напряжения до 430 МПа (на 14 %) привело к разрушению, но при этом долговечность возросла ~ в 1,5 раза.

Еще большее увеличение циклической долговечности фиксируется у образцов из стали 60Г: без ИБ они разрушились через

937440 циклов при напряжении 380 МПа. После ИБ даже при повышении напряжения на 44 % – до 550 МПа (максимальном для диаметра испытываемых образцов) они выдержали более 1 млн циклов и не разрушились.

Таким образом, убедительно показано, что обработка поверхности одним из современных методов – бомбардировкой низкоэнергетическими ионами – существенно повышает сопротивление усталости изделий при циклических нагрузках.

Таблица 2 – Влияние ИБ на циклическую долговечность

Материал и обработка	Величина напряжений, МПа	Количество циклов до разрушения	Результат испытаний
Сталь 40Х, исх.	380	297600	Разрушился
Сталь 40Х, исх. + ИБ	380	1000000	Не разрушился
Сталь 40Х, исх. + ИБ	430	453840	Разрушился
Сталь 60Г, исх.	380	937440	Разрушился
Сталь 60Г, исх. + ИБ	550	1116000	Не разрушился

Выводы

Проведенные исследования показали:

– шлифование поверхности до цементации (а не после) на 40 % повышает предел выносливости высокопрочной стали 20Х2Н4А с хрупкой мартенситной структурой после закалки;

– последующие тонкая полировка и дробеструйный наклёп цементированного слоя ещё больше увеличивают сопротивление усталостному разрушению за счёт существенного уменьшения шероховатости поверхности и создания благоприятных сжимающих напряжений;

– наибольший эффект увеличения циклической долговечности изделий зафиксирован после бомбардировки тонкого поверхностного слоя низкоэнергетическими ионами и достигается значительным измельчением зерна, формированием развитой субструктуры, увеличением плотности дислокаций, «залечиванием» поверхностных дефектов, которые являются местными концентраторами напряжений и потенциальными очагами образования микротрещин;

– решая вопросы технологического обеспечения и повышения качества деталей машин, эксплуатирующихся в условиях циклического нагружения, следует выбирать такие процессы обработки, которые обеспечат ха-

рактеристики поверхностного слоя, гарантирующие долговечность работы изделия.

Литература

1. Кудрявцев И.В. Усталостная прочность сварных конструкций / И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченко. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
2. Вакуленко К.В. Влияние состояния поверхностного слоя на характеристики сопротивления усталости стали 40Х / К.В. Вакуленко, И.Б. Козак, В.М. Мацевитый // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №3/5(81). – С.53-61.
3. Dyachenko S.S., Sverdlin O.V., Zolotko V.A., Kaftanov S.V. Acceleration of Saturation Process and Improving Nitrided Layer Properties // Industrial Heating. – 1998. – V. 65. – №9. – P.99–105.
4. Волосевич П.Ю. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости / П.Ю. Волосевич, Г.И. Прокопенко, В.В. Кныш, О.В. Войтенко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т. 30, № 10. – С. 1429–1443.
5. Панин В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В. Е. Панин, В. П. Сергеев, А. В. Панин, Ю. И. Почиваев // Физика

- металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104, № 6. – С. 650–660.
6. Tatarkina I. Use of the ion-plasma treatment for improving the structural strength of items / S. D'yachenko, I. Tatarkina, I. Doshchechkina, I. Ponomarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 4, # 1, Sumy State University, 2012, 1–4.
 7. Панин В. Е. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В. Е. Панин, В. П. Сергеев, А. В. Панин // Физика металлов и металловедение – 2007. – Т. 104. – № 6. – С. 71–74.
 8. Пономаренко И.В. Влияние различных методов поверхностного упрочнения на усталостную прочность / И.В. Пономаренко, С.С. Дьяченко, И. В. Дошечкина, И. И. Кондратенко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 33. – С. 41–44.

References

1. Kudryavtsev I.V., Naumchenko N.Ye. (1967). Ustalostnaya prochnost' svarnykh konstruksiy M.: Mashinostroyeniye, 270.
2. Vakulenko K.V., Kozak I.B., Matsevityy V.M. (2016) Vliyaniye sostoyaniya poverkhnostnogo sloya na kharakteristiki soprotivleniya ustalosti stali 40KH // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – №3/5(81), 53-61.
3. Dyachenko S.S., Sverdlin O.V., Zolotko V.A., Kaftanov S.V. Acceleration of Saturation Process and Improving Nitrided Layer Properties // Industrial Heating. – 1998. – V. 65. – №9. – P. 99–105.
4. Volosevich, P. YU., Prokopenko, V. V. Knysh, O. V. (2008) Voytenko Strukturnyye izmeneniya v zone svarnogo shva stali St3 pri ul'trazvukovoy udarnoy obrabotke i ikh vliyaniye na povysheniye soprotivleniya ustalosti // Metallofizika i novyeishiy tekhnologii, 30, № 10, 1429-1443
5. Panin, V. Ye., Sergeev V. P., \ Panin A. V., Pochivayev YU. I. (2007) Nanostrukturirovaniye poverkhnostnykh sloyev i naneseniye nanostrukturnykh pokrytiy – effektivnyy sposob uprochneniya sovremennykh konstruksionnykh i instrumental'nykh materialov // Fizika metallov i metallovedeniye. 104, 6, 650 -660.
6. Tatarkina I. Use of the ion-plasma treatment for improving the structural strength of items / S. D'yachenko, I. Tatarkina, I. Doshchechkina, I. Ponomarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 4, # 1, Sumy State University, 2012, 1–4.
7. Panin V. Ye., Sergeev V. P., Panin A. V. (2007) Nanostrukturirovaniye poverkhnostnykh sloyev i naneseniye nanostrukturnykh pokrytiy – effektivnyy sposob uprochneniya sovremennykh konstruksionnykh i instrumental'nykh materialov // Fizika metallov i metallovedeniye, 104, 6, 71-74

8. Ponomarenko I. V., D'yachenko S. S., Doshchechkina I. V., Kondratenko I. I. (2006) Vliyaniye razlichnykh metodov poverkhnostnogo uprochneniya na ustalostnyuyu prochnost' // Vestnik KHNADU, 33, 41-44.

Дошечкина Ирина Васильевна, к.т.н., доц,
Семенчук Владислав Романович, студент,
Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет
(+38)0951628250, divkhadi@ukr.net

THE ROLE OF DIFFERENT METHODS OF SURFACE TREATMENT IN IMPROVING THE FATIGUE DURABILITY OF PRODUCTS

Doshchechkina I.V., Semenchuk V.R., Kharkiv National Automobile and Highway University

***Abstract.Problem.** Operational properties of machine parts and their joints, and first of all fatigue strength, determine the reliability and durability of their basic functions. Statistics show that over 80% of failures arise as the result of destruction due to metal fatigue processes. As you know, fatigue destruction begins in the surface, so its state plays a prominent role in the development of processes of fatigue, in the nature, place and time of the appearance of the fatigue crack and its development. The purpose of the work is to increase the resistance of fatigue and durability of machine parts due to various surface-action methods. For its solution, studies of the influence of various variants of combined methods of mechanical processing, cementation and defaturation on the surface condition, as well as the modern method of bombarding the surface layer with low-energy ions have been carried out. The study of the issue of increasing fatigue strength is particularly important for large-sized and heavy-duty products made of high-strength steels, because at high static strength the probability of fatigue failure increases. It is established that after grinding the surface before cementation, and not after, the endurance limit (σ_{-1}) of steel 20X2H4A increases by 41%, since compressive stresses during cementation reduce the effect of harmful stresses that occur during grinding. An even greater increase in σ_{-1} is achieved after the final blast-furnace treatment due to additional compressive stresses and a significant smoothing of the surface under slander. High efficiency of ionic bombardment of the surface is shown, as a result of which the grain is very ground in the thin surface layer (from 50 μm to 600 nm), the rusted substructure is frozen, defects are rectified (depressions, pores, risks, microcracks) and the surface roughness is significantly reduced. These changes to the surface contributed to a significant increase in durability of products*

Key words: fatigue strength, mechanical processing, shot blasting defaturation, ion bombarding.

РОЛЬ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ В ПІДВИЩЕННІ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ВИРОБІВ

Дощечкіна І.В., Семенчук В.Р.,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет

Анотація. Експлуатаційні властивості деталей машин та їх з'єднань і, в першу чергу, втомна міцність визначають безвідмовність та довговічність виконання ними своїх основних функцій. Статистика свідчить, що понад 80 % відмов виникають через руйнування внаслідок процесів втоми металу. Як відомо, втомне руйнування починається з поверхні, тому саме її стан відіграє визначну роль у розвитку процесів втомленості, в характері, місці та часі появи втомної тріщини та її розвитку. Метою роботи є підвищення опору втомі та довговічності деталей машин за рахунок різних методів поверхневої дії. Для її вирішення проведено дослідження впливу на стан поверхні різних варіантів комбінованих методів механічної обробки, цементації та наклепу, а також сучасного методу бомбардування поверхневого шару низькоенергетичними іонами. Вивчення питання збільшення втомної міцності є особливо важливим для крупногабаритних і

важконавантажених виробів, які виготовляються із високоміцних сталей, бо за високої статичної міцності збільшується імовірність втомного руйнування. Встановлено, що після шліфування поверхні перед цементацією, а не після, на 41 % підвищується границя витривалості (σ_{-1}) сталі 20Х2Н4А, оскільки стискувальні напруження у процесі цементації зменшують дію шкідливих напружень розтягання, які виникають у процесі шліфування. Ще більший приріст σ_{-1} досягається після остаточної дробоструминної обробки за рахунок додаткових стискальних напружень та суттєвого згладжування поверхні при наклепі. Показано високу ефективність іонного бомбардування поверхні, під впливом якого в тонкому поверхневому шарі дуже подрібнюються зерна (з 50 мкм до 600 нм), формується розвинена субструктура, «заліковуються» дефекти, суттєво зменшується шорсткість поверхні.

Ці зміни стану поверхні сприяли опору втомленому руйнуванню та значному збільшенню довговічності виробів

Ключові слова: втомна міцність, механічна обробка, дробоструминний наклеп, іонне бомбардування, шорсткість поверхні, субструктура, границя витривалості.