

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МЕТАЛООБРОБКА

УДК 621.923

© Андилахай А.А.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАТОПЛЕННЫМИ СТРУЯМИ

В работе проведен комплекс экспериментальных исследований, направленных на оценку состояния обрабатываемых поверхностей деталей по результатам абразивной обработки затопленными струями. Установлено, что в процессе обработки происходит беспорядочное неориентированное наложение следов абразивных зерен на обрабатываемые поверхности, в результате чего формируется напряженный поверхностный слой толщиной 4 – 5 мкм. Обработанная поверхность приобретает наклеп, что подтверждается исследованием микротвердости до и после абразивной обработки деталей в свободном состоянии затопленными струями.

Ключевые слова: струйно-абразивная обработка, напряженное состояние, микротвердость, абразивное зерно, наклеп, старение металла, травление, формообразование поверхностного слоя.

Анділахай О.О. Експериментальні дослідження напруженого стану поверхневого шару деталі при абразивній обробці затопленими струменями. У роботі проведено комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку стану оброблюваних поверхонь деталей за результатами абразивної обробки затопленими струменями. Встановлено, що в процесі обробки відбувається безладне неорієнтоване накладення слідів абразивних зерен на оброблювані поверхні, в результаті чого формується напружений поверхневий шар товщиною 4 - 5 мкм. Оброблена поверхня набуває наклеп, що підтверджується дослідженням микротвердості до і після абразивної обробки деталей у вільному стані затопленими струменями.

Ключові слова: струменево-абразивна обробка, напружений стан, микротвердість, абразивне зерно, наклеп, старіння металу, травлення, формоутворення поверхневого шару.

A.A. Andilayah. Experimental studies of the stress state of the surface layer of detail treatment with submerged jets. In the instrument and electrical industry was the use of the method of abrasive machining submerged jet, which is the most promising method for abrasive blasting of small parts of low stiffness. This method eliminates the main drawback chip plants - abrasion channel nozzles or injection nozzles, but the state of the surface layer of machined parts are poorly understood and to make maximum use of the potential to provide the required quality parameters. The study of the state of the surfaces of parts resulting from abrasive blasting traditional methods, dedicated work, which define quality indicators: microhardness depth residual stress, as well as their nature (compressive, tensile). However, known from the literature values correspond to the conditions of surface treatment of parts in a fixed state with an abrasive material through the feed nozzle, and therefore the dynamics of the interaction of a single abrasive grain and significantly different parts. The process in question, and different modes of processing characteristics of the abrasive grains. In the paper, a series of experimental studies designed to assess the state of machined surfaces of parts as a result of abrasion

* д-р техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Andilayah@mail.ru

submerged jets. It is established that during the treatment the non-oriented disorderly traces overlay the abrasive grains on the treated surface, thereby forming a tight skin layer thickness of 4 - 5 micrometers. Processed surface gets cold working, as evidenced by the study of microhardness before and after abrasive machining in a free state submerged jets.

Keywords: *abrasive blast treatment, the state of stress, microhardness, abrasive grain, work hardening, aging of the metal, etching, shaping the surface layer.*

Постановка проблеми. В приборостроении и электротехнической промышленности получил применение метод абразивной обработки деталей затопленными струями, являющийся наиболее перспективным методом струйно-абразивной обработки мелких деталей малой жесткости. Данный метод исключает основной недостаток струйно-абразивных установок – абразивный износ каналов сопел или инжекционных насадок, однако недостаточно изучен и не позволяет в максимальной степени использовать потенциальные возможности в плане обеспечения требуемых параметров качества. Это требует дальнейших исследований технологических закономерностей данного метода, особенно состояния поверхностного слоя деталей, обработанных методом абразивной обработки затопленными струями.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию состояния поверхностного слоя деталей, полученного в результате струйно-абразивной обработки, посвящены работы, в которых определены качественные показатели: микротвердость, глубина остаточных напряжений, а также их характер (сжимающие, растягивающие). Однако известные из литературных источников данные [1, 2] соответствуют условиям обработки поверхностей деталей в закрепленном состоянии с подачей абразивного материала через сопла, в связи с чем динамика взаимодействия единичного абразивного зерна и детали значительно отличается. Рассматриваемый процесс отличается режимами обработки и характеристиками абразивных зерен.

Цель статьи. Целью статьи является экспериментальное исследование некоторых физико-механических свойств деталей из различных материалов, обработанных методом абразивной обработки затопленными струями сжатого воздуха. Для достижения поставленной цели необходимо решить проблему обеспечения адекватных условий обработки на экспериментальных образцах.

Изложение основного материала. Напряженное состояние поверхностного слоя детали при абразивной обработке затопленными струями зависит, прежде всего, от ее габаритных размеров, массы и скорости абразивных зерен (которая определяется давлением сжатого воздуха на входе в сопловое устройство, расположенное на дне рабочей камеры). Как установлено выше, при относительно малых размерах абразивных зерен их способность производить микрорезание и пластическое деформирование снижается. В поверхностных слоях детали возникают незначительные деформации, в результате чего не обеспечивается требуемое их упрочнение. С увеличением размера абразивных зерен увеличиваются напряжения, возникающие в зоне контакта зерен и поверхности металла, и сьем металла происходит в основном за счет микрорезания и пластического отеснения металла.

Для выяснения степени влияния каждого из этих параметров на остаточные напряжения и наклеп были проведены эксперименты на образцах из ВТ1 и 65Г, обладающих упругими свойствами, при следующих технологических параметрах абразивной обработки затопленными струями: абразивный материал – карбид кремния зеленый 63С зернистостью 63П, объемом 0,18 л; Расход сжатого воздуха 1 м³/мин при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа, время обработки 30 мин. Исследования остаточных напряжений проводились на образцах с размерами 60×20×0,18 мм. Образцы в состоянии поставки полосы не имели заметных отклонений от правильной геометрической формы, что не исключало напряженного состояния металла. Для снятия возможных поверхностных напряжений все образцы подвергались ускоренному (вибрационному) старению на вибрационном стенде с частотой колебаний 23,3 Гц в течение 60 мин. После операции старения наличие внутренних напряжений проверяли стравливанием металла с одной стороны контрольного образца-свидетеля. В результате стравливания слоя металла образец не изменил первоначальной формы, что свидетельствовало об отсутствии напряжений поверхностного слоя. Перед началом обработки образцы попарно спаивали припоем по углам точечной пайкой так, чтобы одна плоская сторона образца была изолирована от струйно-

абразивного воздействия (рис. 1).

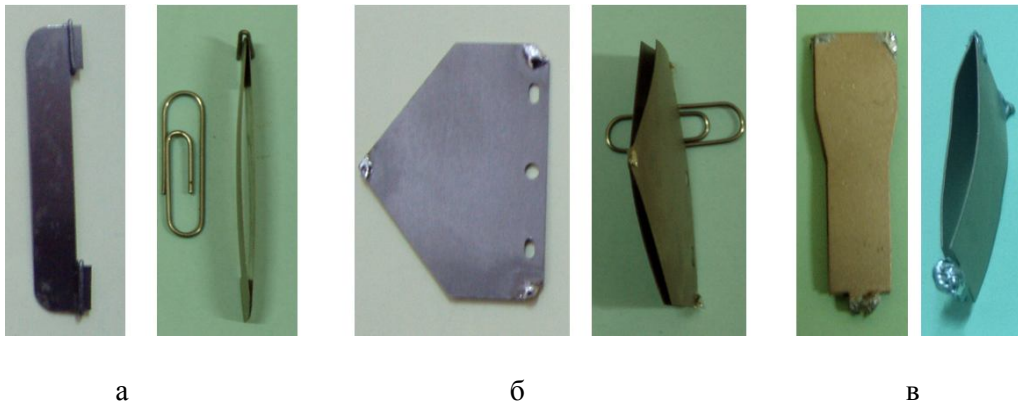


Рис. 1 – Внешний вид спаренных деталей до и после абразивной обработки затопленными струями: а – материал ВТ-1; б – сталь 65Г; в – бериллиевая бронза БрБ2

После обработки в течение 30 мин попарно соединенные образцы становились двояковыпуклыми, т.е. образовывали два шаровых сегмента с прямоугольным периметром, после распайки стрелка хорды увеличивалась еще на некоторую величину, что свидетельствовало о достижении равновесия в напряжениях с двух противоположных сторон образцов – обработанной и необработанной. Глубина напряженного слоя определялась путем измерения деформации образца (рис. 2) при непрерывном стравливании металла с обработанной струйно-абразивным методом стороны образца до тех пор, пока образец не выровнялся и становился плоским.

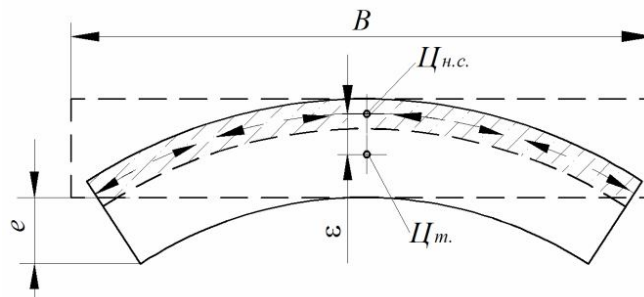


Рис. 2 – Расчетная схема к определению среднего значения напряжения в наклепанном слое (заштрихованный участок): \mathcal{C}_m – центр тяжести пластины; $\mathcal{C}_{н.с.}$ – центр тяжести наклепанного слоя

В результате стравливания металла толщина заготовки уменьшилась на разных образцах от 5 до 6 мкм (замеры толщины контрольных образцов выполняли на горизонтальном оптиметре) с последующим расчетом по формуле [3]:

$$\sigma_{cp} = \frac{8E\epsilon e}{B^2 \epsilon \Delta F}, \quad (1)$$

где σ_{cp} – среднее значение напряжения в наклепанном слое, Н/мм²; E – модуль упругости материала, Н/мм²; I – момент инерции пластины, мм⁴; ϵ – расстояние между центром наклепанного слоя и центром тяжести всего сечения пластины, мм; B – длина пластины, мм; e – изгиб пластины (стрелка хорды), мм; ΔF – площадь поперечного сечения наклепанного слоя, мм².

На рис. 2 представлена расчетная схема к формуле (1) [4]. На схеме изображен образец с наклепанным слоем, характеризующимся сжимающими напряжениями. Формальным признаком наличия сжимающих напряжений в наклепанном слое является его выпуклость. Величина прогиба (стрелка хорды) определяется замером образца, размещенного на плоской поверхности

с помощью рейсмаса за вычетом толщины образца (рис. 2). На рис. 3 приведена зависимость прогиба пластины (с наибольшим габаритным размером, равным 60 мм) в результате образования поверхностных напряжений от времени обработки. Получены следующие результаты замеров прогиба, отнесенного к 60 мм длины пластины: деталь из титанового сплава ВТ-1 – $e = 3,75$ мм; из стали 65Г – $e = 3,5$ мм; из бериллиевой бронзы – $e = 3,25$ мм.

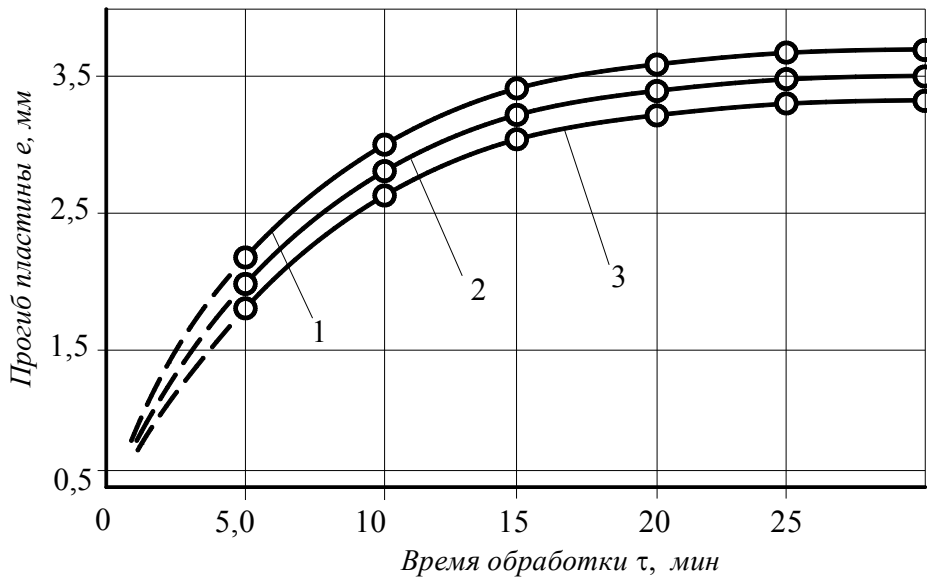


Рис. 3 – Зависимость прогиба пластины в результате образования поверхностных напряжений от времени обработки: 1 – титановый сплав ВТ-1 толщиной 0,18 мм; 2 – сталь 65Г толщиной 0,2 мм; 3 – бериллиевая бронза БрБ2 толщиной 0,25 мм

Глубину напряженного (наклепанного) слоя определяли путем его стравливания (признаком удаления наклепанного слоя, а, следовательно, и ликвидации напряжений, является восстановление плоскостности образца по мере стравливания слоя металла). В результате замеров установлено, что толщина слоя на образцах из титанового сплава ВТ-1 и стали 65Г равна 5 мкм, а на образце из бериллиевой бронзы БрБ2 равна 6 мкм. Таким образом, можно считать, что глубина наклепанного слоя для различных материалов приблизительно одинакова. Используя полученные данные, по зависимости (1) определено среднее значение напряжения в наклепанном слое для образца из стали 65Г:

$$\sigma_{cp1} = \frac{8 \cdot 2,2 \cdot 10^5 \cdot 0,0033 \cdot 3,5}{3600 \cdot 0,1 \cdot 0,016} = 3529,16 \text{ г/мм}^2 = 35,29 \text{ Н/мм}^2.$$

Аналогично определены средние значения напряжения в наклепанном слое для образцов из титанового сплава ВТ-1 и из бериллиевой бронзы БрБ2, которые соответственно равны: $\sigma_{cp2} = 37,81 \text{ Н/мм}^2$ и $\sigma_{cp3} = 32,77 \text{ Н/мм}^2$.

Как видно, наиболее предрасположены к образованию напряжений: титановый сплав ВТ-1 и сталь 65Г. Вместе с тем, из рис. 3 вытекает одинаковая интенсивность приобретения наклепа тремя исследуемыми материалами. Следовательно, в условиях абразивной обработки затопленными струями наблюдается устойчивая тенденция к образованию сжимающих напряжений, повышающих твердость, прочность на изгиб и продольную устойчивость деталей. При этом по мере увеличения продолжительности обработки не возникает перенаклеп и не снижается металлосъем, что можно объяснить стабильностью ударов абразивных зерен об обрабатываемую поверхность под острым углом.

Из рис. 3 следует, что с увеличением времени обработки до 20–25 минут прогиб пластин-

ки непрерывно увеличивается, а затем фактически остается неизменным. Это коррелируется с экспериментальными данными изменения шероховатости поверхности [3] и свидетельствует о стабилизации параметров процесса через 20 – 25 минут обработки. Таким образом, экспериментально установлено, что при абразивной обработке затопленными струями в поверхностном слое обрабатываемой детали возникают благоприятные сжимающие напряжения. Это указывает на преобладание силового фактора над тепловым фактором в процессе обработки и свидетельствует о высоком качестве обрабатываемых поверхностей.

Дополнительным подтверждением времени формирования поверхностного слоя обрабатываемых деталей являются результаты измерений микротвердости (по Виккерсу) поверхностей деталей из различных материалов до и после обработки на микротвердомере ПМТ-3. Замеры микротвердости выполняли с помощью алмазной пирамиды с выдержкой нагрузки 1,5 Н в течение 15 с. На каждом образце производили по 10 измерений. Поэтапное изменение микротвердости деталей из алюминия АД, латуни ЛС59.1, латуни Л63, стали Ст3, стали 65Г (рис. 4) завершается через 20 – 25 мин, и далее стабилизируется на разных уровнях в зависимости от предрасположенности материалов к наклепу. Из графиков, приведенных на рис. 4, видно, что наиболее восприимчивыми к наклепу в процессе абразивной обработки затопленными струями из рассмотренных материалов являются алюминий АД и сталь 65Г.

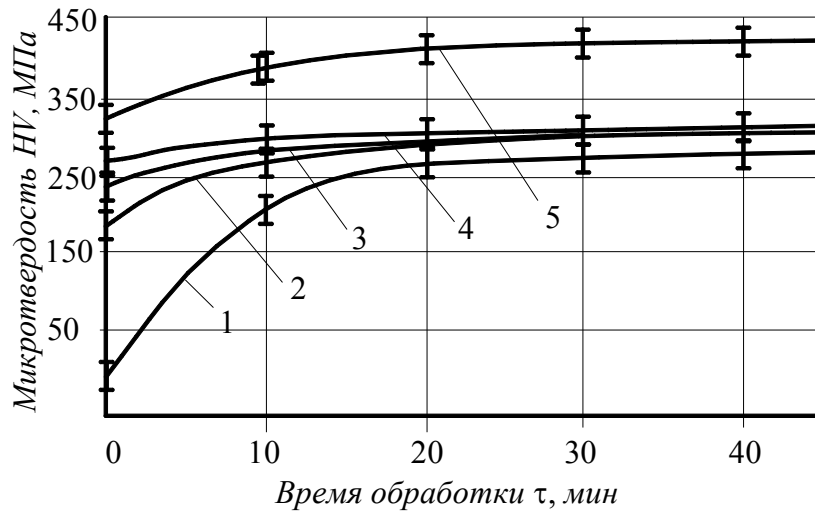


Рис. 4 – Зависимость микротвердости (по Виккерсу) деталей от времени их обработки: 1 – алюминий АД; 2 – латунь ЛС59.1; 3 – латунь Л63; 4 – сталь Ст3; 5 – сталь 65Г

В процессе абразивной обработки затопленными струями абразивные частицы взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью в воздушно-жидкостном потоке, при этом капли жидкости постоянно смачивают абразивные частицы, проникают непосредственно в зону контакта. В связи с этим существенное влияние на закономерности формообразования новой поверхности в процессе абразивной обработки затопленными струями должен оказывать эффект Ребиндера П.А. Для его реализации необходимо включение в состав суспензии какого-либо из поверхностно активных веществ, к которым отнесены жирные кислоты, например, олеиновая кислота.

Сущность явления состоит в облегчении процессов деформирования и разрушения твердых тел и самопроизвольном протекании в них структурных изменений в результате понижения их свободной поверхностной энергии при контакте со средой, содержащей вещества, способные к адсорбции на межфазной поверхности. Эффект Ребиндера проявляется при совместном действии среды (в данном случае жидкой составляющей суспензии) и механических напряжений, создаваемых ударами абразивных зерен. Суть эффекта состоит в снижении прочности и возникновении хрупкости обрабатываемого металла. После абразивной обработки затопленными струями необходима промывка деталей чистой водой с тем, чтобы указанный эффект

не проявился в процессе функционирования (эксплуатации) готовых деталей в изделии.

Тепловые структурные изменения, происходящие в зоне контакта, не могут повлиять на соседние объемы металла, в связи с чем аналогичные изменения в поверхностном слое деталей в целом при таких условиях маловероятны, т.е. происходить не могут. Поэтому можно считать, что возникновение остаточных напряжений обусловлено деформационными процессами, происходящими при многократных ударных воздействиях абразивных зерен по обрабатываемой поверхности.

Выводы

1. Разработана новая методика определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали после ее абразивной обработки затопленными струями, состоящая в защите одной стороны обрабатываемой детали от абразивного воздействия такой же деталью, прикрепленной к первой детали пайкой по кромкам. На ее основе установлено, что в процессе обработки возникает наклеп глубиной 4 – 6 мкм. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое детали увеличивается в течение 20 – 25 мин обработки, после чего стабилизируется, при этом обработанная поверхность становится выпуклой, т.е. возникают сжимающие остаточные напряжения. Это указывает на преобладание силового фактора над тепловым фактором в процессе обработки и свидетельствует о высоком качестве обрабатываемых поверхностей.

2. Произведены измерения микротвердости (по Виккерсу) поверхностей деталей из различных материалов до и после обработки на твердомере ПМТ-3 с помощью алмазной пирамиды с выдержкой нагрузки 1,5 Н в течение 15 с. В результате установлено, что с течением времени обработки происходит увеличение микротвердости деталей из алюминия АД, латуни ЛС59.1, латуни Л63, стали Ст3, стали 65Г. Через 20–25 мин обработки микротвердость стабилизируется на разных уровнях в зависимости от предрасположенности материалов к наклепу. Наиболее восприимчивыми к наклепу в процессе абразивной обработки затопленными струями из рассмотренных материалов являются алюминий АД и сталь 65Г. Из этого сделан вывод о возможности повышения качества поверхностного слоя деталей в процессе обработки.

Список использованных источников:

1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К. : Техника, 1989. – 177 с.
2. Белецкий Д.Г. Основные параметры безэжекционной гидроабразивной обработки / Д.Г. Белецкий, В.Н. Жемчугов // Вестник машиностроения. – 1967. – № 5. – С. 53-56.
3. Андилахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андилахай. – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – 190 с.
4. Андилахай А.А. Теоретические и экспериментальные исследования формообразования поверхностей деталей в процессе обработки свободными абразивными зёрнами / А.А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. : Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2000. – Вип. 10. – С. 164-172.

Bibliography:

1. Provolotsky A.E. Chip Processing Machinery Parts / A.E. Provolotsky. – K. : Tehnika, 1989. – 177 p. (Rus.)
2. Beletsky D.G. Basic parameters no ejection waterjet machining / D.G. Beletsky, V.N. Zhemchugov // Vestnik mashinostroeniya. – 1967. – № 5. – P. 53-56. (Rus.)
3. Andilahay A.A. Abrasive machining of parts submerged jet / A.A. Andilahay. – Mariupol : PSTU, 2006. – 190 p. (Rus.)
4. Andilahay A.A. Theoretical and experimental investigations of forming surfaces of the parts in the processing of loose abrasive grains / A.A. Andilahay // Reporter of the Priazovskiy state technical university: collection of scientific works. – Mariupol, 2000. – Issue 10. – P. 164-172. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 10.12.2014