

УДК 621.923

А. А. АНДИЛАХАЙ

ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна

ЗАКОНОМЕРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТВА ПОВЕРХНЮВНОГО СЛОЮ ДЕТАЛІ ПРИ АБРАЗІВНОЇ ОБРОБЦІ ЗАТОПЛЕННИМИ СТРУЯМИ

На основі розробленої методики визначення залишкових напружень в поверхнювному шарі оброблюваної деталі встановлено, що в процесі абразивної обробки затопленими струями виникають сжимаючі напруження (образується наклеп). При цьому величина напружень збільшується в часі 20-25 хв обробки, потім стабілізується. За таким же законом змінюється мікротвердість оброблюваної деталі.

Ключові слова: абразивна обробка, зернистість абразива, титановий сплав, сталь, берилієва бронза, залишкові напруження, мікротвердість, час обробки.

Введення. Розвиток виробничих потужностей, зв'язаних з точною механікою, електронікою, прецизійним обладнанням і нанотехнологіями, вимагає нових підходів до виконання трудоміких ручних операцій фінішної обробки малих точних деталей малої жорсткості і складної конфігурації. Одним з найбільш перспективних напрямків в розв'язанні даної проблеми є механізація операцій фінішної обробки деталей вільним зернистим абразивним матеріалом на основі застосування прогресивного методу абразивної обробки затопленими струями. Даний метод має ряд переваг порівняно з традиційними методами струйно-абразивної обробки і дозволяє підвищити ефективність обробки, однак недостатньо вивчений. В особливий спосіб це стосується до якості обробки: залишкові напруження в поверхнювному шарі оброблюваної деталі, мікротвердості деталі, якості обробки кромки деталі і стабільності во часі параметрів процесу. Тому дослідження закономірностей абразивної обробки деталей затопленими струями має велике наукове і практичне значення, відкриває нові технологічні можливості підвищення якості, продуктивності і стабільності обробки малих точних деталей (масою до 3 г) малої жорсткості і складної конфігурації.

Стан проблеми. В роботах [1-5] наведено результати експериментальних досліджень основних технологічних параметрів струйно-абразивної обробки. Велике увагу в них приділено дослідженню закономірностей зняття металу і формоутворення поверхнювностей деталей. Показано вплив різних технологічних факторів на параметри шорхуватості поверхнювності і на цій основі обґрунтовано оптимальні умови обробки. Однак ці результати отримані застосовуючи до обробки достатньо габаритних деталей, оскільки, як відомо, при обробці малих деталей застосування методів струйно-абразивної обробки малоєфективно. В зв'язі з цим, важливо оцінити параметри якості оброблюваних поверхнювностей малих деталей при використанні перспективного методу абразивної обробки затопленими струями, т.е. встановити, наскільки ефективно застосування даного методу для обробки малих деталей з точки зору забезпечення параметрів

качества поверхностного слоя детали. Решению этой проблемы и посвящена настоящая работа.

Цель работы – обоснование условий повышения качества поверхностного слоя детали при абразивной обработке затопленными струями на основе экспериментальных исследований закономерностей съема металла и формообразования поверхностей деталей.

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). В работе [6] установлено, что 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 съем металла происходит в основном за счет микрорезания и пластического отслаивания металла.

Для выяснения степени влияния каждого из этих параметров на остаточные напряжения и наклеп были проведены эксперименты на образцах из титанового сплава ВТ1 и стали 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 (рис. 1).

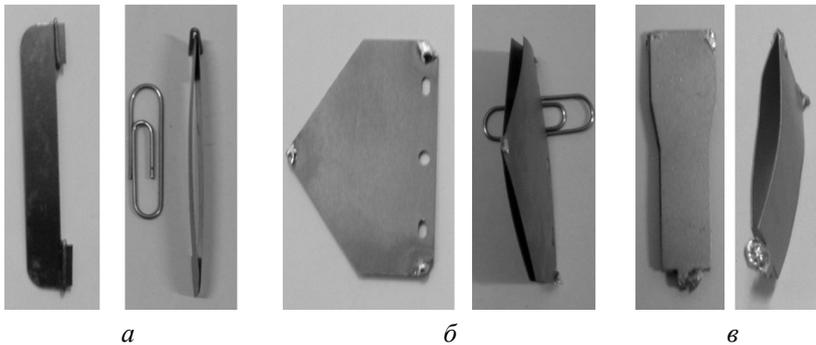


Рис. 1. Внешний вид спаренных деталей до и после абразивной обработки затопленными струями: *а* – титановый сплав ВТ-1; *б* – сталь 65Г; *в* – бериллиевая бронза БрБ2

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).

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 выравнялся и становился плоским. 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 Саверина М. М. [7]:

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

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.

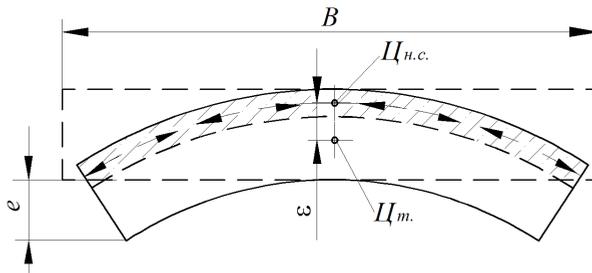


Рис. 2. Расчетная схема к определению среднего значения напряжения в наклепанном слое (заштрихованный участок): Ц_m – центр тяжести пластины; $\text{Ц}_{н.с.}$ – центр тяжести наклепанного слоя

На рис. 2 представлена расчетная схема к формуле (1). 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 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.

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, которое равно $\sigma_{cp} = 35,29 \text{ Н/мм}^2$.

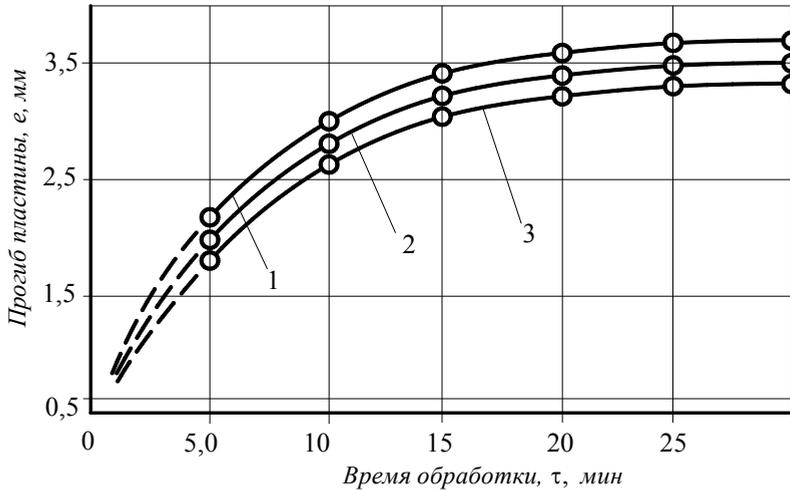


Рис. 3. Зависимость прогиба пластины в результате образования поверхностных напряжений от времени обработки: 1 – титановый сплав ВТ-1 толщиной 0,18 мм; 2 – сталь 65Г толщиной 0,2 мм; 3 – бериллиевая бронза БрБ2 толщиной 0,25 мм

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

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 пластинки непрерывно увеличивается, а затем фактически остается неизменным. Это 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.

При изучении формообразования поверхности в процессе абразивной обработки затопленными струями особого внимания требует изучение механизма скругления острых кромок и удаления заусенцев. На рис. 5 представлена фотография кромки одного из торцов листовой детали, обработанной абразивным методом затопленными струями: на кромке (ребре) след абразивного зерна. Кромка является результирующей 20 снимков со смещением резкости от вершины кромки по 1–2 мкм в глубину изображения.

Кромка (ребро) детали, находившейся в рабочей камере в течение 5–7 секунд, была расположена на столе микроскопа так, что обе грани, прилегающие к ребру, составляли по 45° к плоскости стола микроскопа. Эта деталь не имеет заусенцев, однако нуждается в скруглении острых кромок.

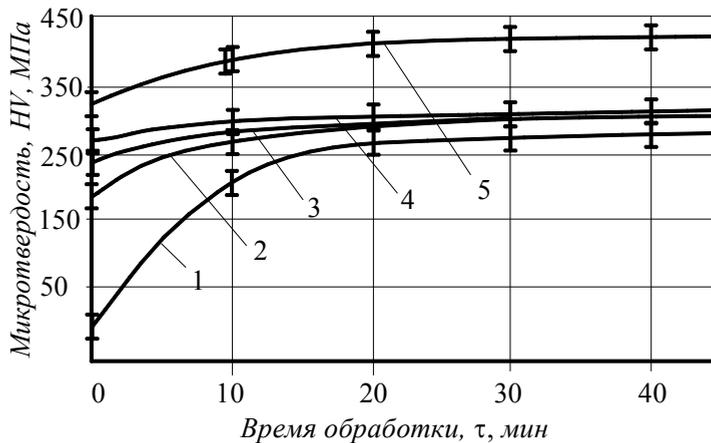


Рис. 4. Зависимость микротвердости (по Виккерсу) деталей от времени их обработки: 1 – алюминий АД; 2 – латунь ЛС59.1; 3 – латунь Л63; 4 – сталь Ст3; 5 – сталь 65Г

На рис. 5 видно, что одно абразивное зерно оставило свой след на кромке, с чего и начался процесс ее скругления.



Рис. 5. Фотография кромки одного из торцов листовой детали, $\times 850$

Необходимо отметить, что в отличие от следов абразивных зерен, которые образуются при обработке плоской поверхности, при обработке кромки детали след абразивного зерна имеет четко выраженную форму, фактически отсутствуют навалы деформированного металла по обе стороны и впереди следа. Иными словами, кинетической энергии движущегося абразивного зерна достаточно для образования полного микросреза, тогда как при обработке плоской поверхности детали образуются, как правило, неполные срезы, а движущиеся абразивные зерна фактически теряют свою кинетическую энергию и останавливаются в обрабатываемом металле. Из этого можно сделать вывод о том, что при обработке кромки детали энергоёмкость процесса меньше, чем при обработке плоской поверхности, и поэтому интенсивность съема металла в этом случае больше. Подтверждением тому является приведенные на рис. 6 фотографии кромок деталей со следами абразивных зерен на кромках, на которых видны четкие полные микросрезы, что свидетельствует о высоком качестве обработки кромок детали. Глубина резкости в данном случае получена в результате программной обработки 20 фотоснимков.

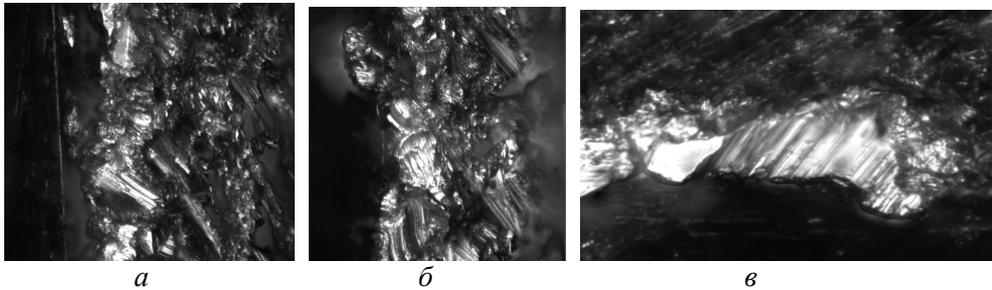


Рис. 6. Фотографии фрагментов кромки листовой латунной детали со следами абразивных зерен: *а* – $\times 500$; *б* – $\times 650$; *в* – $\times 850$

При обработке деталей в свободном (незакрепленном) состоянии наиболее уязвимыми для разрушения оказываются заусенцы, так как они не защищены полупространством с двух противоположных сторон, а в перпендикулярном направлении имеют, в качестве защиты, такие же легкоразрушаемые заусенцы. Общеизвестно, что заусенцы на мелких листовых штампованных деталях образуются из-за зазоров между пуансоном и матрицей штампа. Причем, чем больше толщина и зазор, тем толще и выше заусенец. При зазоре, равном толщине штампуемого металла, осуществляется загиб металла. Поскольку данный метод обработки не обладает бесконечными возможностями съема металла, необходимо ограничить величину допустимых заусенцев при абразивной обработке затопленными струями. Ограничение устанавливали, руководствуясь средней длиной следа абразивного зерна на обрабатываемой поверхности, полученной на основании аналитических выводов, и путем замера следов, полученных съемкой под микроскопом. Она составляет 0,03 – 0,04 мм. Указанный диапазон значений является наиболее предпочтительным для обработки деталей с шириной в основании заусенца, не превышающей 0,04 мм. Высота заусенца – это величина, зависящая от его ширины, материала штампуемой заготовки, а также от остроты пуансона и матрицы штампа. Как правило, высота заусенца не превышает три его толщины. Обработка деталей с заусенцами, ширина которых больше указанной выше величины, потребует более 30 мин машинного времени.

Особенностью абразивной обработки затопленными струями деталей из листовой штамповки является то, что в отличие от всех известных методов обработки высокие заусенцы сначала загибаются на плоскости, а затем срезаются у основания, т.е. реализуется случай, когда создаются благоприятные по энергоёмкости условия обработки с уменьшающейся глубиной микрорезания. Для других методов обработки характерно загибание заусенцев в отверстия, пазы и на торцы из-за «пакетирования» плоских деталей. Эта особенность метода абразивной обработки затопленными струями позволяет решать проблемы зачистки от заусенцев узких пазов, в которых должны перемещаться без зазоров и заеданий стержни или втулки.

Стабильность хода процесса абразивной обработки затопленными струями в значительной мере зависит от постоянства количества и качества всех технологических и конструктивных параметров. Иными словами, необходимо сохранить: диаметр сопел, давление сжатого воздуха, а, следовательно, расход сжатого воздуха, размер зерен, количество абразивного материала и количество жидкой составляющей абразивной суспензии. На рис. 7 показан характер изменения основных параметров обработки за время работы установки (2,5 часа), что в 5 раз превышает время осуществления одной технологической операции.

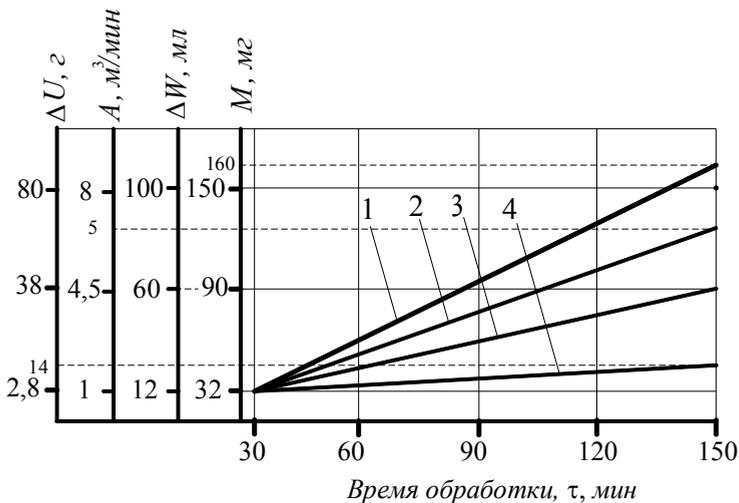


Рис. 7. Зависимости съема металла M (1), износа абразива ΔU (2), расхода сжатого воздуха A (3) и уноса жидкости ΔW (4) от времени абразивной обработки затопленными струями

Производилась обработка деталей из латуни ЛС59.1 при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа. Приведенные на рис. 7 графики указывают на высокую стабильность основных параметров процесса обработки, поскольку отклонения, выражающиеся в снижении съема металла и увеличении расхода сжатого воздуха, отсутствуют. Отклонения, связанные с износом абразива за время операции (30 мин), составляют 0,5–0,7 %, а с уносом жидкости 2 %.

Этим показано, что данный метод обработки, в отличие от известных методов струйно-абразивной обработки, за счет исключения износа сопел позволяет стабилизировать во времени основные параметры обработки.

Выводы. На основе разработанной методики определения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали, состоящей в защите одной стороны детали от абразивного воздействия такой же деталью, прикреп-

ленной к первой детали пайкой по кромкам, установлено, что в процессе абразивной обработки затопленными струями возникают сжимающие напряжения (происходит наклеп). При этом величина напряжений увеличивается в течение 20–25 мин обработки, затем стабилизируется. По такому же закону изменяется микротвердость обрабатываемой детали: через 20–25 мин обработки микротвердость стабилизируется на разных уровнях в зависимости от предрасположенности материалов к наклепу. Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцевых поверхностях обрабатываемых мелких деталей. Показано, что рассматриваемый метод обработки, в отличие от известных методов струйно-абразивной обработки, за счет исключения износа сопел позволяет стабилизировать во времени основные параметры обработки.

Список литературы

1. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 177 с.
2. Шманев В. А. Струйно-абразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мещеряков. – М.: Машиностроение, 1995. – 143 с.
3. Исупов М. Г. Разработка, исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.08 Технология машиностроения / Исупов Максим Георгиевич. – М.: РГБ, 2007. – 432 с.
4. Зверев Е. А. Влияние режимов струйно-абразивной обработки на шероховатость поверхности деталей под плазменное напыление покрытий / Е. А. Зверев // Материаловедение: сб. науч. тр. – Новосибирск: Новосибир. гос. техн. ун-т, 2008. – № 2 (52). – С. 109–114.
5. Цыгановский А. Б. Технологические возможности гидроабразивной обработки затопленными струями / А. Б. Цыгановский // Вибрации в технике и технологиях. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – № 2(58). – С. 205–215.
6. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.
7. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – М.: Машгиз, 1955. – 312 с.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2014

О. О. АНДИЛАХАЙ

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІ ПРИ АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ

На основі розробленої методики визначення залишкових напруг у поверхневому шарі оброблюваної деталі встановлено, що в процесі абразивної обробки затопленими струменями виникають стискаючі напруги (відбувається наклеп). При цьому величина напруг збільшується протягом 20–25 хв. обробки, потім стабілізується. По такому ж закону змінюється микротвердість оброблюваної деталі. Експериментально встановлено, що найбільша інтенсивність знімання матеріалу при абразивній обробці затопленими струменями досягається на торцевих поверхнях оброблюваних дрібних деталей. Показано, що розглянутий метод обробки, на відміну від відомих методів струминно-абразивної обробки, за рахунок виключення зношування сопел дозволяє стабілізувати в часі основні параметри обробки.

Ключові слова: абразивна обробка, зернистість абразиву, титановий сплав, сталь, берилієва бронза, залишкові напруги, микротвердість, час обробки.

A. A. ANDILAKHAI

LAWS OF FORMATION OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE SURFACE LAYER PART WHEN ABRADED SUBMERGED JETS

The developed methods for determining residual stresses in the surface layer of the workpiece is established, that in the process of abrading submerged jets arise compressive stress (strain hardening occurs). The magnitude of the voltage is increased during 20-25 minutes of treatment, and then stabilized. According to the same law changes microhardness of the workpiece. It was established experimentally that the maximum material removal rate in abrasive machining submerged jets is achieved on the end surfaces machined small parts. It is shown, that this method of processing, in contrast to known methods abrasive blasting, by eliminating wear to stabilize the nozzles in time basic processing parameters. Consequently, in terms of a submerged jet abrading steady tendency to the formation of compressive stresses increase hardness, flexural and longitudinal stability details. Thus increasing the processing time does not occur or is reduced excessive hardening metal removal, that may explain the stability of the abrasive grains strikes the surface to be treated under an acute angle.

Keywords: abrasive treatment, titanium alloy, stainless steel, beryllium copper, residual stresses, microhardness, processing time.

Андилахай Александр Александрович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», ГБУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина, Andilahay@mail.ru