

УДК 621. 9. 015

## РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ НАКЛЕПА ПРИ ДРОБЕСТРУЙНОМ УПРОЧНЕНИИ ЗУБЬЕВ БАТАНА ТКАЦКОГО СТАНКА ТИПА СТБ

**Касимов Бахтиер Мурат угли**

к- техн. наук доцент Андижанский Машиностроительный институт

E-mail: [kasimovbaxtiyor.1991@gmail.com](mailto:kasimovbaxtiyor.1991@gmail.com)

**Шин Илларион Георгиевич**

д-р техн. наук, профессор, Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: [igshin54@mail.ru](mailto:igshin54@mail.ru)

**Муминов Мансурбек Рахимжонович**

к- техн. наук ведущий специалист АО “Пахтасаноат илмий маркази”

E-mail: [mansurbek@mail.ru](mailto:mansurbek@mail.ru)

### АННОТАЦИЯ

В статье приведены материалы по теоретическому определению глубины наклепа поверхностного слоя – важнейшего параметра качества обработанной поверхности, ответственного за долговечность деталей машин, в частности, зубьев батана бесчелночных ткацких станков, подвергающихся изнашиванию внутренних контактных поверхностей при работе в паре с нитепроводником.

Глубину наклепа при дробеударном упрочнении микрошариками определяли через усилие внедрения, связанное с размером пластического отпечатка (диаметр лунки) при допущении постоянства среднего давления сопротивления внедрению или среднего давления течения (предела текучести) на поверхности контакта при движении недеформируемого шарика в обрабатываемой среде.

**Ключевые слова:** поверхностно-пластическое деформирование, дробеударная обработка, наклеп, зуб батана, глубина наклепа, предел текучести, сила, микрошарик.

## CALCULATION OF THE DEPTH OF HARDENING DURING SHOT BLASTING HARDENING OF THE TEETH OF THE BATAN LOOM OF THE STB TYPE

**Kasimov Bakhtiyor Murat ugli**

Doctor of philosophy in technical sciences,  
Professor Andijan Machine-Building Institute, Uzbekistan, Andijon  
E-mail: [kasimovbaxtiyor.1991@gmail.com](mailto:kasimovbaxtiyor.1991@gmail.com)

**Shin Illarion Georgievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Tashkent Institute of Textile and Light Industry,  
E-mail: [igshin54@mail.ru](mailto:igshin54@mail.ru)

**Muminov Mansurbek Raximjonovich**

Doctor of philosophy in technical sciences sciences leading specialist AO  
“Пахтасаноат илмий маркази” Uzbekistan, Tashkent  
E-mail: [mansurbek@mail.ru](mailto:mansurbek@mail.ru)

### ABSTRACT

The article presents materials on the theoretical determination of the depth of work hardening of the surface layer - the most important parameter of the quality of the treated surface, responsible for the durability of machine parts, in particular, the teeth of the batan of shuttleless looms, which are subject to wear of the internal contact surfaces when working in tandem with the thread guide.

The depth of work hardening during shot-impact hardening with microballs was determined through the penetration force associated with the size of the plastic imprint (hole diameter) under the assumption that the average penetration resistance pressure or the average flow pressure (yield strength) on the contact surface was constant during the movement of a non-deformable ball in the treated medium.

**Keywords:** surface-plastic deformation, shot-peening, hardening, batan tooth, hardening depth, yield strength, force, microball.

Отделочно-упрочняющая обработка ответственных деталей машин, осуществляемая методами поверхностного пластического деформирования (ППД), и являющаяся окончательной операцией технологического процесса изготовления изделий, в большинстве случаев успешно конкурирует и даже

заменяет традиционные способы финишной обработки – хонингование, суперфиниширование, доводка и др.

Методы ППД деталей машин основаны на целенаправленном использовании пластических свойств металлов, т.е. способность поверхностных слоев обрабатываемых деталей воспринимать остаточные деформации без нарушения сплошности упрочненной поверхности. При этом методы ППД обеспечивают высокую производительность обработки, низкую шероховатость поверхности и формирование требуемых физико- механических свойств поверхностного слоя деталей, что положительно влияют на эксплуатационные показатели (работоспособность, долговечность) рабочих органов машин и механизмов в различных отраслях промышленности.

Дробеударная обработка относится к простым и одновременно к эффективным методам отделочно- упрочняющей обработки деталей машин, требующих высокую долговечность, надежность и усталостную прочность. Существенное увеличение несущей способности элементов конструкций и деталей связано с формированием поверхностного слоя, в котором образованы благоприятные сжимающие остаточные напряжения и произошло деформационное упрочнение (наклеп) [1,2,3], а трансформированная поверхность отличается меньшей шероховатостью и улучшенным микропрофилем. Особенно это заметно при действии циклической нагрузки, сопровождающейся часто ударом, например, для зубьев пильных дисков хлопкоперебатовывающих машин (джины, линтера), деталей батанных механизмов на бесчелночных ткацких станков СТБ и др.

Станки СТБ, являясь наиболее универсальным и совершенным из бесчелночных ткацких станков, широко применяются во всех основных отраслях текстильной промышленности для выработки тканей. Наиболее распространенной неисправностью батанного механизма ткацкого станка СТБ является износ зубьев направляющей гребенки (зубьев батана) (рис. 1) по внутренним контактными поверхностям [4, 5]. Зубья батана являются направляющими при движении нитепрокладчиков через зев, т.е. образуют направляющий канал для прокладчиков утка (микрочелноков), представляющих собой пластину в виде стального полого корпуса с коническим мыском. Небольшие размеры прокладчика (90x14x6,35 мм) и малая масса (40 г) позволяют значительно повысить скорость прокладки утка в зеве (до 22-24 м/с), уменьшить высоту зева и сократить расход энергии на этот процесс.



Рис. 1. Зуб батана одноименного механизма ткацкого станка СТБ

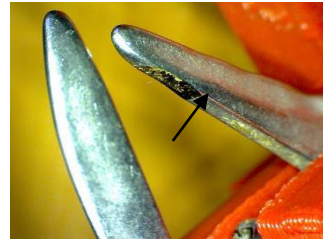


Рис. 2. Износ внутренних контактных поверхностей зубьев батана

Характерное изнашивание контактных поверхностей зубьев батана в виде лунок износа (рис. 2) происходит при силовом скользящем контакте с нитепрокладчиком утка. Износ зубьев батана наиболее интенсивно происходит на коротком участке зева и представляет некоторую криволинейную поверхность (лунку), что вызвано соответствующим профилем рабочих поверхностей нитепроводника в виде полуцилиндра.

В результате появления лунки износа происходит изменение относительного положения контактных поверхностей пары “нитепроводник – зуб батана” и при высокой скорости скольжения нитепроводника по зубьям батана возникают дополнительные динамические нагрузки в зоне их контакта. Это может привести к возрастанию обрывности нитей основы при тканеформировании.

Износостойкость поверхности ответственных деталей технологических машин характеризует их важнейшее эксплуатационное свойство, зависящее от показателей качества изготовления изделий, что напрямую является следствием применяемого технологического процесса при окончательной обработке. Среди тенденций развития современных технологических процессов финишной обработки необходимо отметить такое важное направление, как совершенствование методов механической упрочняющей технологии и распространение их для специальных деталей рабочих органов технологических машин с целью создания высокого качества их поверхностного слоя. В первую очередь это касается упрочняющей технологии, основанной на поверхностном пластическом деформировании. В результате наклепа (деформационного упрочнения) в поверхностном слое деталей происходят необратимые изменения кристаллических зерен, увеличиваются твердость и плотность дислокаций, формируются сжимающие остаточные напряжения. Эти изменения способствуют повышению износостойкости и сопротивляемости усталостным разрушениям деталей машин. Таким образом, учитывая специфику нарушения работоспособности зубьев батана ткацкого станка, было бы целесообразно

использовать метод поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности зева с помощью динамической обработки микрошариками в потоке с сжатым воздухом [6, 7].

Критерием эффективности дробеударного упрочнения являются такие параметры качества обработанной поверхности как глубина  $h_n$  и степень наклепа (относительное повышение микротвердости). Аналитическое определение глубины наклепа, основанное на анализе процесса соударения недеформируемого сферического индентора с упрочняемой металлической поверхностью, и подтвержденное результатами экспериментальных исследований, позволяет использовать его для обоснования режимных параметров и условий дробеструйной обработки.

Толщина (глубина) пластически деформированного (наклепанного) поверхностного слоя, полученного при ударном вдавливании шара, практически равна глубине наклепа, полученной при статическом однократном вдавливании сферического индентора, если выполняется условие равенства диаметра отпечатков. Поэтому зависимости параметров деформирования от толщины наклепанного слоя для случая статического вдавливания могут быть применены и для ударного нагружения.

Глубина наклепа  $h_n$  пропорциональна глубине отпечатка  $h$  (рис. 3), т.е.  $h_n = \alpha h$ , где коэффициент  $\alpha = 2 \dots 20$  для различных условий обработки [8]. Глубина наклепа  $h_n$  связана с нормальной силой деформирования (контактной нагрузкой)  $P$  известным соотношением С.Г.Хейфица

$$h_n = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \text{ мм} \quad (1)$$

где  $P$  - нормальная сила вдавливания, Н;

$\sigma_m$  - предел текучести (физический) обрабатываемого материала Н/мм<sup>2</sup> (МПа).

Формула, предложенная И.В.Кудрявцевым и Г.Е.Петушковым [9], отличается от (1) введением коэффициента  $m$ , косвенно учитывающего размеры контактной площадки:

$$h_n = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \text{ мм} \quad (2)$$

где  $m = 1 + 0,07R$ ,  $R$  - приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей, мм.

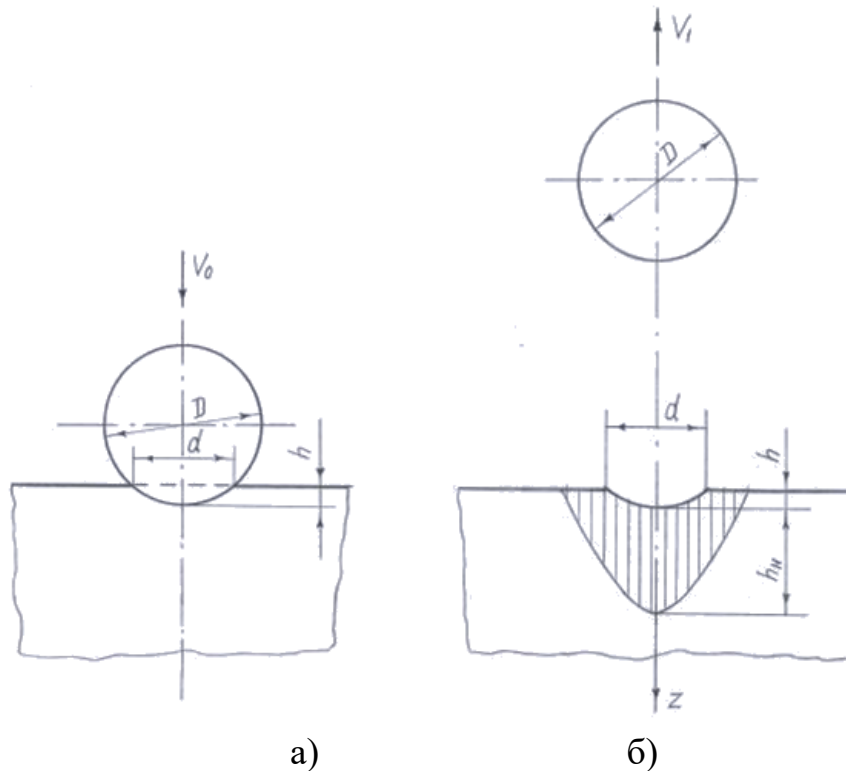


Рис. 3. Схема единичного контакта при дробеударной обработке:

а) упругопластическое взаимодействие микрошарика диаметром  $D$  с обрабатываемой поверхностью ( $d$ ,  $h$  – соответственно диаметр и глубина пластического отпечатка); б) формирование упрочненного (наклепанного) слоя толщиной  $h_H$  при отскоке ударяющейся дроби

В случае динамического контакта сферического индентора с плоской поверхностью механической преграды (зуба батана) имеем  $R=R_{ш}$  - радиус шарика. Поэтому зависимость (2) принимает вид:

$$h_H = \frac{1}{1+0.07R_{ш}} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \text{ мм} \quad (3)$$

Если отсутствуют данные по пределу текучести  $\sigma_T$ , то можно воспользоваться для конструкционных сталей с погрешностью не более  $\pm 10\%$  соотношением  $\sigma_T \approx HB/3$ , где  $HB$  – твердость по Бринелю.

Статическую силу  $P$  (усилие внедрения микрошарика) с достаточным приближением ( $10..15\%$ ) можно определить аналитически. Данное решение для расчета силы вдавливания сферического пуансона (шара) выполнил А.Д.Томленов [10], используя метод характеристик при отсутствии трения по поверхности вдавливания. В соответствии с данным решением статическая сила связана с размером пластического отпечатка формулой

$$P = \omega \pi \sigma_T \left[ \left( 1 + \frac{\pi}{2} \right) r^2 + \left( \frac{R^2}{2} - r^2 \right) \arcsin \frac{r}{R} - \frac{r}{2} \sqrt{R^2 + r^2} \right], \text{ Н} \quad (4)$$

где  $\omega = 1, 1$  – коэффициент, учитывающий трение в контакте шар-деталь;

$\sigma_m$  – предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

$R$  – радиус микрошарика, мм;

$r$  – радиус пластического отпечатка, мм.

Радиус пластического отпечатка после однократного соударения можно определить из характеристик упрочняемого материала и режима упрочения [11].

$$r = 2R^4 \sqrt{\frac{\gamma v^2}{6gH_{м.дин}}}, \text{ мм} \quad (5)$$

где  $\gamma$  – удельный вес материала микрошарика, г/см<sup>3</sup>;

$v$  – скорость полета микрошарика, м/с;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$H_{м.дин}$  – динамическая твердость обрабатываемого материала, кг/мм<sup>2</sup>.

В отличие от статического при ударном вдавливании шара с увеличением числа ударов до 15...20 размер отпечатка для различных условий обработки увеличивается в 1,25...1,55 раз, а затем остается практически постоянным. Поэтому в формулу (5) следует ввести коэффициент  $k$ , учитывающий увеличение радиуса отпечатка в результате многократного взаимодействия:

$$r = 2Rk^4 \sqrt{\frac{\gamma v^2}{6gH_{м.дин}}}, \text{ мм} \quad (5, a)$$

В формуле (5, a) динамическую твердость  $H_{м.дин}$  обрабатываемого материала следует выразить через статическую твердость по Бринеллю [12]

$$H_{м.дин} = H_D = (1,6 \dots 1,7) HB \quad (6)$$

Усилие внедрения микрошарика  $P$ , связанное с размером пластического отпечатка  $d = 2r$  (рис. 3), можно также определить из допущения, что среднее давление сопротивления внедрению или среднее давление течения (предел текучести  $\sigma_m$ ) на поверхности контактирования остается постоянной. Тогда процесс соударения недеформируемого сферического индентора с упрочняемой металлической поверхностью описывается следующим соотношением, вытекающим из уравнения движения шарика в обрабатываемой среде и параметров пластического отпечатка:

$$P = \pi \rho_0 r^2 = -m \frac{d^2 h}{dt^2}, \quad (7)$$

где  $\rho_0$  – давление текучести, предполагаемое постоянным и  $\rho_0 = \sigma_T$ ;  $m$  – масса сферического индентора.



Из рис. 3 следует, что радиус пластического отпечатка  $r=d/2$  связан с радиусом сферического индентора  $R=D/2$  и глубиной отпечатка зависимостью  $r^2 = 2Rh - h^2$ .

Поэтому при взаимодействии абсолютно жесткой сферы с деформируемым полубесконечным твердым телом выражение (7) принимает вид

$$P = \pi\sigma_T(2Rh - h^2) = -m \frac{d^2h}{dt^2},$$

если пренебречь величиной  $h^2$  ввиду незначительной глубины внедрения  $h$  по отношению к диаметру  $D$ , то окончательно получим уравнение движения шарика в обрабатываемой среде

$$P = 2\pi\sigma_T Rh = -m \frac{d^2h}{dt^2} \quad (8)$$

или 
$$\frac{d^2h}{dt^2} + \frac{D\pi\sigma_T}{m} h = 0 \quad (8, a)$$

Решение уравнения (8, а) запишем в виде

$$h = v_0 \sqrt{\frac{m}{\pi D \sigma_T}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{\pi D \sigma_T}{m}} \cdot t\right), \text{ мм} \quad (9)$$

где  $v_0$  – начальная скорость удара, м/с;

$t$  – продолжительность удара (время соударения), с.

Максимальное внедрение (сжатие) микрошарика составит

$$h = v_0 \sqrt{\frac{m}{\pi D \sigma_T}}, \text{ мм} \quad (10)$$

когда  $\sin\left(\sqrt{\frac{\pi D \sigma_T}{m}} t\right) = 1$ , т.е.  $\sqrt{\frac{D \pi \sigma_T}{m}} + t = \frac{\pi}{2}$ ,

откуда

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{\pi D \sigma_T}}, \text{ с} \quad (11)$$

Поставив значение максимального внедрения  $h$  из (10) в (8), получим формулу для силы удара

$$P = v_0 \sqrt{\pi m D \sigma_T}, \text{ Н} \quad (12)$$

Для практического использования зависимости (12) удобно массу микрошарика  $m$  выразить через плотность  $\rho_m$  и объем  $V$ :  $m = \rho_m \cdot V$ ,

где  $V = \frac{\pi D^3}{6}$ .

С учетом приведенных соотношений формула (12) принимает окончательный вид



$$P = \pi D^2 v_0 \sqrt{\frac{\rho_m \sigma_T}{6}}, \text{ Н} \quad (12, \text{ а})$$

Для теоретического определения глубины наклепа  $h_H$  в формулу (1) подставим выражение для силы удара дроби (12) и после преобразований получим расчетную формулу

$$h_H = D^4 \sqrt{\frac{\pi^2 v_0 \rho_m}{24 \sigma_T}}, \text{ мм} \quad (13)$$

С учетом размера микрошарика  $D=0,3 \dots 0,4$  мм рассчитаем глубину наклепа  $h_H$  по данной зависимости при различных скоростях  $v_0$  и пределах текучести  $\sigma_T$ , соответствующих большой группе углеродистых и легированных сталей конструкционного и инструментального назначений. Так, глубина наклепа при следующих данных:  $D=0,3$  мм,  $v_0=15$  м/с,  $\rho_m=7,8$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_T=500$  Н/мм<sup>2</sup> составила  $h_H=0,058$  мм, что соответствует приемлемой величине, характерной для процесса дробеударного упрочнения.

Вследствие того, что формула (13) с большой степенью достоверности позволяет аналитически определить глубину наклепа  $h_H$ , произведена оценка ее зависимости от режимного параметра (скорости дроби  $v_0$ ) и физико - механического свойства материала (предела текучести  $\sigma_T$ ) с целью выявления некоторых закономерностей.

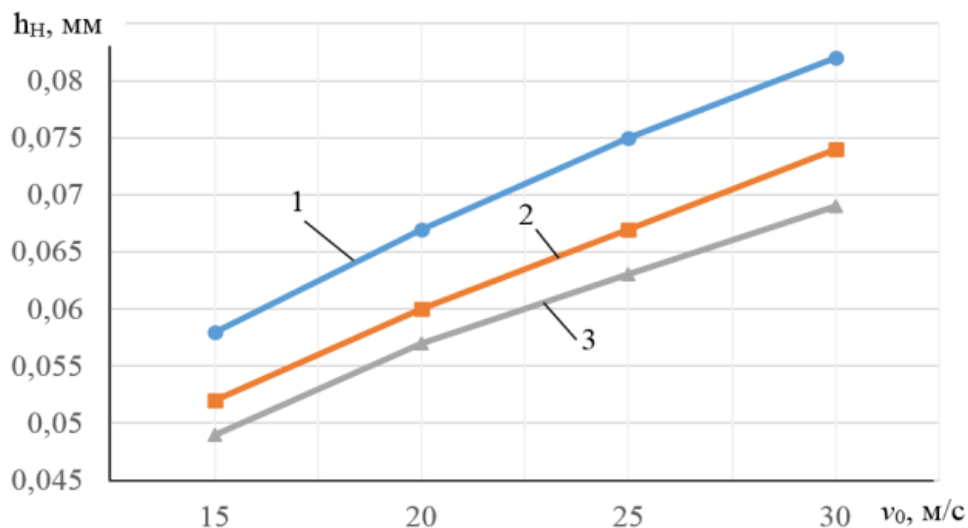


Рис. 4. Зависимость глубины наклепа  $h_H$  от скорости дроби  $v_0$  при различных значениях предела текучести  $\sigma_T$ :

1 – 500 Н/мм<sup>2</sup>, 2 – 800 Н/мм<sup>2</sup>, 3 – 1000 Н/мм<sup>2</sup>.

Как свидетельствуют расчетные данные, с увеличением скорости удара  $v_0$  микрошарика глубина наклепа  $h_H$  монотонно возрастает (рис. 4) в пределах 40,8 - 42,3% в зависимости от предела текучести  $\sigma_T=500-1000$  Н/мм<sup>2</sup>. При  $\sigma_T=500$

$\text{H}/\text{мм}^2$  глубина наклепа увеличивается от значений  $h_H = 0,058$  до  $0,082$  мм, если  $\sigma_T=800 \text{ H}/\text{мм}^2$  – в пределах  $h_H=0,052$  до  $0,074$  мм, при  $\sigma_T=1000 \text{ H}/\text{мм}^2$  – глубина наклепа достигает величины  $h_H=0,049 - 0,069$  мм.

При увеличении предела текучести в два раза (от  $500$  до  $1000 \text{ H}/\text{мм}^2$ ) наибольшая разница глубины наклепа наблюдается при  $v_0=30$  м/с и составляет  $0,013$  мм.

Достоверность расчетных значений глубины наклепа  $h_H$ , полученных по формуле (13) проверялась путем сопоставления с экспериментальными данными, изложенными в работе [13]. Так, при дробеструйной обработке титановых сплавов ( $\sigma_T=780-1075 \text{ H}/\text{мм}^2$ ) стальными шариками диаметром  $0,5$  мм со скоростью  $v_0=65$  м/с глубина упрочнения составила  $0,2$  мм. Расчетное значение  $h_H$  по формуле (13) при этих данных составляет  $0,18$  мм, что составляет относительную разность расчетных и экспериментальных данных  $10\%$ , являющуюся вполне допустимой в расчетной практике при проектировании технологических процессов в машиностроительном производстве.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ: (REFERENCES)

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320с.
2. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240с.
3. Овсеенко А.Н., Серебряков В.И., Гаек М.М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. – М.: “Янус-К”, 2004. –294с.
4. Худых М.И. Ремонт текстильных машин. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 288с.
5. Касимов Б.М. Разработка метода повышения работоспособности ткацкого станка СТБ дробеструйной обработкой рабочих поверхностей зубьев батана: Дис. ... докт. филос. По техн. наук. – Наманган: НамТИ, 2022.- 141 с.
6. Kasimov B.M., Muminov M.R, Shin I.G. Analytical assessment of the influence of the intensity of technological residual Voltagees in the surface layer of teeth on the durability of Saw blades for gins // International Journal of Advanced Academic Studies, - India, 2020; 2(2): 102-103. ISSN: 2706-8927 (05.00.00; IF 5.12)
7. Касимов.Б.М., Муминов М.Р., Шин И.Г. Технологический способ повышения работоспособности батанного механизма станков типа СТБ. - В кн.: «Фан, таълим, ишлаб чиқариш интеграциялашуви шароитида пахта тозалаш тўқимачилик, энгил саноат, матбаа ишлаб чиқариш инновацион технологиялари

долзарб муаммолари ва уларнинг ечими». Республика илмий – амалий онлайн тезислар тўплами. Ташкент, 2020 й. 228-232 б.

8. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

9. Кудрявцев И.В., Петушков Т.Е. Влияние кривизны поверхности на глубину пластической деформации при упрочнении поверхностным наклепом // Вестник машиностроения. - Москва, 1966. - №7. -С. 41-48.

10. Кравченко Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке. – Куйбышев: КПТИ, 1981. – 90 с.

11. Саверин М.М., Дробеструйный наклеп. Теоретические основы и практика применения. - М.: Машгиз. 1955. – 321 с.

12. Клейс И.Р., Кангур Х.Ф. Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждений от удара сферического индентора // Трение и износ.- Москва,1987. -Т.8.№4-С.605-613.

13. Дрозд М.С., Федоров А.В., Лебский С.А. Выбор режимов дробеструйной обработки, обеспечивающих заданные параметры наклепанного слоя // Вестник машиностроения. – Москва, 1977. -№3. – С. 42-45.