

5-28-2021

## ENERGY RATIOS IN THE CONTACT INTERACTION OF SHOT WITH THE HARDENED SURFACE OF MACHINE PARTS

I G. Shin

*Tashkent Institute of Textile and Light Industry*

R Kh Maksudov

*Ferghana State University*

M R. Muminov

*JSC "Scientific center of cotton industry"*

Sh Sh Shukhratov

*Ferghana State University*

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

---

### Recommended Citation

Shin, I G.; Maksudov, R Kh; Muminov, M R.; and Shukhratov, Sh Sh (2021) "ENERGY RATIOS IN THE CONTACT INTERACTION OF SHOT WITH THE HARDENED SURFACE OF MACHINE PARTS," *Scientific-technical journal*: Vol. 4 : Iss. 1 , Article 4.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol4/iss1/4>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact [sh.erkinov@edu.uz](mailto:sh.erkinov@edu.uz).

## MECHANICS

УДК 677.21.03.021.1

**ENERGY RATIOS IN THE CONTACT INTERACTION OF SHOT WITH THE HARDENED SURFACE OF MACHINE PARTS****<sup>1</sup>Shin I.G., <sup>2</sup>Maksudov R.Kh., <sup>3</sup>Muminov M.R., <sup>2</sup>Shukhratov Sh.Sh.**<sup>1</sup>Tashkent Institute of Textile and Light Industry,<sup>2</sup>Ferghana State University,<sup>3</sup>JSC "Scientific center of cotton industry"**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДРОБИ С УПРОЧНЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛЕЙ МАШИН****<sup>1</sup>Шин И.Г., <sup>2</sup>Максудов Р.Х., <sup>3</sup>Муминов М.Р., <sup>2</sup>Шухратов Ш.Ш.**<sup>1</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,<sup>2</sup>Ферганский государственный университет,<sup>3</sup>АО «Научный центр хлопковой индустрии»**МАШИНА ДЕТАЛЛАРИ ЮЗАСИГА МИКРОШАРЧАЛАР ТАЪСИРИДАН ҲОСИЛ БЎЛГАН ЭНЕРГЕТИК БОҒЛАНИШЛАР****<sup>1</sup>Шин И.Г., <sup>2</sup>Максудов Р.Х., <sup>3</sup>Муминов М.Р., <sup>2</sup>Шухратов Ш.Ш.**<sup>1</sup>Тошкент тўқимачилик ва енгил саноати институти,<sup>2</sup>Фарғона давлат университети<sup>3</sup>АО «Пахтасаноат илмий маркази»

**Abstract:** The article describes the features of the energy ratios during shot-impact hardening of machine parts. On the basis of schematization and analysis of the contact interaction of shot with the treated surface, dependences were obtained for calculating the velocity recovery factor upon impact, which is the main informative indicator for assessing the residual stress and thermo physical state of the surface layer of critical parts of machines and mechanisms.

**Keywords:** plastic deformation, latent energy, shot hammering, velocity recovery factor, thermodynamics.

**Аннотация:** В статье изложены особенности энергетических соотношений при дробеударном упрочнении деталей машин. На основе схематизации и анализа контактного взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью получены зависимости для расчета коэффициента восстановления скорости при ударе, являющегося основным информативным показателем для оценки остаточного напряженного и теплофизического состояния поверхностного слоя ответственных деталей машин и механизмов.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, скрытая энергия, дробеударная обработка, коэффициент восстановления скорости, термодинамика.

**Аннотация:** Мақолада машина деталларини микрошарчалар билан мустаҳкамлаганда энергия нисбатларининг хусусиятлари келтирилган. Ўзаро таъсирини схематиклаштириши ва таҳлил қилиши асосида тезликни тиклаш коэффициентини ҳисоблаш учун боғлиқликлари олинган, ушбу муҳим машина деталлари ва механизмларининг сирт қатламининг қолдиқ кучланишини ва термофизик ҳолатини баҳолаш учун асосий маълумотлар ва кўрсаткичи ҳисобланади.

**Таянч сўзлар:** пластик деформация, яширин энергия, микрошарча ёрдамида қайта ишлаш, тезликни тиклаш коэффициенти, термодинамика.

## MECHANICS

Усталостная прочность, долговечность и эксплуатационная надежность ответственных деталей машин и механизмов в значительной мере определяются качеством их поверхностного слоя после финишной механической обработки. Состояние поверхностного слоя деталей характеризуется комплексом геометрических и физико-механических параметров: шероховатость, глубина и степень деформационного упрочнения, остаточные напряжения, плотность дислокаций и др. Каждый из этих параметров, находясь в зависимости от режимов и условий механической обработки, является откликом структуры обрабатываемого материала на температурно-силовое воздействие, возникающее в конкретном технологическом процессе при изготовлении деталей машин.

Различные операции механической обработки по формоизменению деталей со снятием припуска с помощью лезвийного и абразивного режущего инструмента, а также отделочно – упрочняющей обработки (обкатка шариком и роликом, обдувка дробью и др.) осуществляются при непосредственном контакте рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемой поверхностью изделия. Съем припуска или деформационное упрочнение (наклеп) поверхностного слоя деталей происходит при упруго-пластическом деформировании металла и интенсивном трении между контактными поверхностями инструмента и обрабатываемой детали, следствием которых неизбежно являются масса-, тепло- и энергопереносы между контактирующимися твердыми телами. Поэтому обоснованным и надежным средством для моделирования контактного взаимодействия тел в процессах механической обработки являются результаты анализа энергетических соотношений в соответствии с законами термодинамики необратимых процессов.

В паре трения, представляющей собой открытую термодинамическую систему [1], непрерывно происходят перенос и трансформирование механической энергии. Применение законов термодинамики предусматривает тщательный анализ источников генерирования энергетических потоков и их преобразований в процессе пластической деформации металлов, которая составляет основу контактного взаимодействия инструмента с деталью при механической обработке.

Работа, затрачиваемая на пластическую деформацию металла при технологических операциях, представляет собой механическую энергию. При этом большая часть (до 97%) механической энергии трансформируется в тепло, а оставшая часть (~ 0,5 ... 3%) аккумулируется в поверхностном слое металла в виде так называемой скрытой энергии наклепа. Понятие скрытой энергии вводится на основе первого закона термодинамики:

$$\Delta U = W + Q, \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии тела;

$Q$  – тепловой эффект, связанный с деформацией (положительный при поглощении тепла);

$W$  – работа (положительная, если производится над телом).

В соответствии с первым законом термодинамики (1) изменение внутренней энергии  $\Delta U$  деформируемого тела с учетом теплообразования при механической обработке представится в виде

$$\Delta U = W - Q \text{ или } W = Q + \Delta U \quad (2)$$

При деформационном упрочнении или наклепе изменение внутренней энергии  $\Delta U$  есть положительная величина и равна скрытой энергии наклепа  $U_s$ . Поэтому справедливы следующие соотношения:

$$\Delta U = W - Q = U_s; \quad Q < 0 < W; \quad |Q| < |W|. \quad (2)$$

Скрытая энергия деформирования определяет степень необратимых изменений кристаллического строения металлов при их пластической деформации созданием в них дефектов различного уровня – точечные дефекты в виде вакансий и примесных атомов, дефектов упаковки, но главным образом, в виде линейных несовершенств – дислокаций. Дислокационный механизм пластической деформации подтверждается прямыми экспериментами (возрастанием плотности дислокаций  $\rho$ , см<sup>-2</sup> на три-четыре порядка, а также резким увеличением плотности вакансий). Поэтому величина скрытой энергии

## MECHANICS

деформирования, представляющая собой плотность энергии, накопленной поверхностным слоем в результате пластической деформации при механической обработке, является по существу энергией дислокаций [2]. В пользу такого вывода свидетельствуют данные Д. Мак Лина [3]: относительный вклад дислокаций, вакансий и внедренных атомов в упрочнение металлов составляют соответственно 4,5:2:1.

Запасание энергии при пластической деформации приводит к формированию остаточных напряжений, блокированию дислокаций и связано с такими физическими процессами, как внутреннее трение, упругий гистерезис, экзоэлектронная эмиссия и др. Таким образом, скрытая энергия может служить основным интегральным и информативным параметром состояния поверхностного слоя, отвечающим как за степень деформационного упрочнения, так и за интенсивность остаточного поля напряжений. Необходимо также отметить, что важность оперирования запасенной энергией в процессах механической обработки определяется тем, что она может быть использована как связующий параметр для синтеза микро- и макропредставлений о физико-механических явлениях, происходящих в поверхностном слое твердых тел под нагрузкой.

Методы поверхностного пластического деформирования (ППД) деталей машин основаны на использовании пластических свойств металлов и способности металлических заготовок воспринимать остаточные деформации без нарушения сплошности обрабатываемой поверхности. Наибольшее распространение среди ударных методов обработки ППД получила дробеударная, осуществляемая воздействием потока дробей (шариков) из стали, чугуна и других материалов с большой скоростью на упрочняемую поверхность. Эффективность данного метода упрочнения выражается в значительном повышении долговечности деталей, и в особенности с фасонным и нежестким профилем, как лопатки турбин, пружины, рессорные листы и др.

Дробеударная обработка осуществляется одновременными и многочисленными ударами дробин, имеющих различные углы атаки  $\alpha$  относительно обрабатываемой поверхности деталей (рис.1). Из-за полидеформационного характера контактного взаимодействия и зависимости от многих факторов (размера и скорости удара частицы, угла атаки, плотности потока, времени обработки, физико-механических свойств материала) необходима схематизация дробеударного упрочнения, построенная на ряде допущений:

1. Из потока струи дробей выделим одну дробинку и будем считать, что она соударяется со средней скоростью потока  $v_0$  под прямым углом  $\alpha = 90^\circ$  с поверхностью упрочняемого тела и внедряется в него, а не скользит по нему. Возникающее трение является трением удара.

2. В начальной стадии деформационный процесс на силовом контакте моделируем одноактным соударением жесткой сферической недеформируемой частицы (дробин), что вполне приемлемо, если в качестве дробин применять шарики из стали ШХ15 с высокой твердостью (HRC62), прочностью, низкой шероховатостью и точностью по геометрии.

3. Деформируемое тело представляется упругим полупространством, отражающим плоскую поверхность обрабатываемой детали. Правомерность такого допущения определяется тем, что размеры пластического отпечатка (лунки) значительно меньше деформируемого тела (рис.2):  $d \ll D$

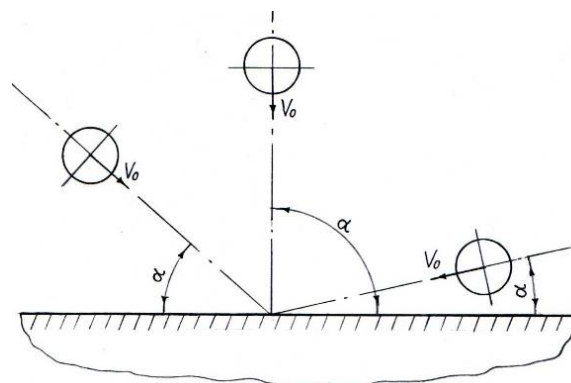


Рис. 1. Схема взаимодействия дроби с различными углами атаки  $\alpha$  с обрабатываемой поверхностью.

## MECHANICS

4. Обрабатываемый материал принимаем однородным и изотропным в соответствии с положением, принятым в теории упругости и пластичности.

5. Интенсивность соударений деформирующих частиц на любом обрабатываемом участке остается постоянной с одинаковой удельной плотностью. Вероятность попадания за конечный, но малый отрезок времени на упрочняемый участок  $\Delta S$  двух ударов пренебрежимо мала по сравнению с одним ударом.

Необходимо также предположить, что на активном этапе удара сферическая частица не разрушается, а скорость удара  $v_0$  значительно меньше скорости

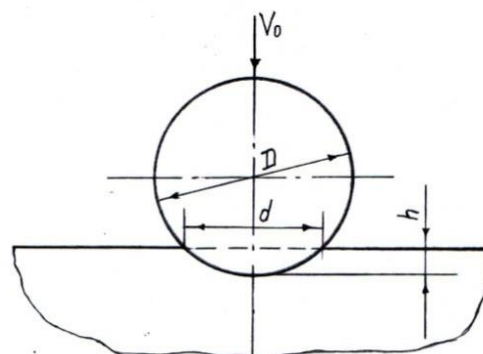


Рис. 2. Схема упругопластического взаимодействия дроби диаметром  $D$  с обрабатываемой поверхностью:  $d$  и  $h$  – соответственно диаметр и глубина пластического отпечатка.

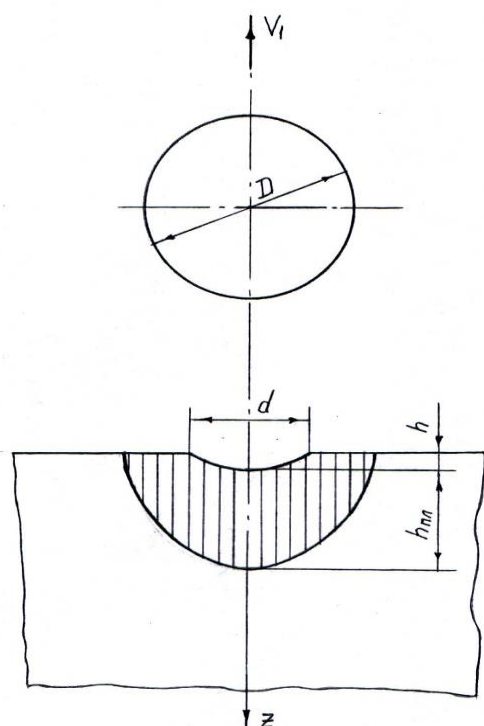


Рис. 3. Формирование упрочненного слоя толщиной  $h_{пл}$  в очаге деформирования при единичном контакте в процессе дробеударной обработки.

распространения возмущений в виде упругих волн сжатия и сдвига в материале [4]. Поэтому задачу контактного взаимодействия ударяющей частицы с материалом преграды можно решить квазистатически, т.е. считать, что взаимные перемещения сферической твердой частицы и упругого полупространства, а также усилия на контакте связаны уравнениями статики.

Обработка поверхности детали ударами дроби характеризуется локальностью деформационного процесса и параметрами очага деформирования (рис.3). В результате ударного воздействия деформирующей среды на обрабатываемой поверхности создаются повреждения в виде пластического отпечатка (лунки). Это возможно, если кинетическая энергия  $W_0$  летящей дроби достаточна для формирования на поверхности контакта интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , превышающих

динамический предел текучести  $\sigma_{т.д.}$ . В случае полного укрытия поверхности отпечатками можно предположить, что сжатие всех слоев по толщине в среднем соответствует деформациям осевого сжатия под одним отпечатком.

Деформированное состояние при дробеударной обработке характеризуется следующими параметрами: степень поверхностной деформации  $\psi$ , оцениваемой отношением  $d/D$  (рис.3); толщина упрочненного (пластически деформированного) слоя  $h_{пл}$ ; интенсивность деформации  $\varepsilon_{zz}$  в осевой зоне очага деформации; равномерность покрытия поверхности отпечатками, определяемая соотношением  $Y=(F_{отп}/F_{зар}) \cdot 100\%$ , где  $F_{отп}$  – суммарная площадь отпечатков;  $F_{зар}$  – площадь обрабатываемой поверхности заготовки [5, 13].

Всесторонний анализ контактного взаимодействия дроби с обрабатываемой поверхностью и решение ряда технологических задач (определение глубины наклепа, остаточных напряжений сжатия, температуры контакта и др.) невозможен без знания важнейшего параметра – коэффициента восстановления скорости  $k$  при ударе,

## MECHANICS

представляющего собой отношение скорости отскока (в конце удара)  $v_1$  к скорости удара (вначале удара)  $v_0$  частицы при прямом ударе о неподвижную поверхность:

$$k = v_1 / v_0 \quad (4)$$

В результате контакта частицы с металлической преградой происходит потеря ее первоначальной кинетической энергии  $W_0 = mv_0^2/2$  (энергии перед ударом) из-за упруго – пластических деформаций металла и трения. Поэтому скорость отскока  $v_1$  частицы будет меньше, чем  $v_0$ , и энергия отскочившейся частицы соответственно будет равна  $W_1 = mv_1^2/2$ . Следовательно, абсолютное уменьшение кинетической энергии  $\Delta W$  ударяющейся частицы можно определить по соотношению

$$\Delta W = W_0 - W_1 = W_0(1 - k^2) = mv_0^2(1 - k^2)/2. \quad (5)$$

где  $1 - k^2 = \beta$  – производный коэффициент потерь энергии.

Корректность выражения (5) основывается на том, что при допущении о достаточно твердых по сравнению с металлической преградой сферических частич, последние не разрушаются и на их пластическое деформирование энергия не расходуется. Из уравнения (5) представим коэффициент восстановления  $k$  через энергию частицы перед ударом  $W_0$  и абсолютное изменение энергии  $\Delta W$ :

$$k = \sqrt{1 - (\Delta W / W_0)} = \sqrt{1 - \beta} = \sqrt{W_1 / W_0}. \quad (6)$$

Рассмотрев упруго – пластическое внедрение сферического индентора в плоскую поверхность материала и распространив закон Мейера на процесс соударения и пластического внедрения твердой частицы (шарика) в плоскость, получена зависимость для расчета коэффициента восстановления скорости при ударе [5]:

$$k = 1,33 \sqrt{R_1^{0,75} \cdot H_\mu^{1,25} / (W_0^{0,25} \cdot E_{np})}. \quad (7)$$

где  $R_1$  – радиус шарика;  $H_\mu$  – динамическая твердость по Мейру;

$E_{np}$  – приведенный модуль упругости материалов индентора и преграды, определяемый по формуле

$$\frac{1}{E_{np}} = \frac{1 - \mu^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_o^2}{E_o},$$

где  $E_1$ ,  $\mu_1$  и  $E_o$ ,  $\mu_o$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов индентора и преграды.

Формулу (7) можно привести к более удобному виду для расчетной практики, если использовать установленную взаимосвязь между динамической твердостью по Мейеру и статической твердостью по Бринеллю ( $H_\mu = 1,6 \cdot HB$ ):

$$k = 1,79 \sqrt{R_1^{0,75} \cdot HB^{1,25} / (W_0^{0,25} \cdot E_{np})}. \quad (8)$$

Анализ зависимостей (7) и (8) показывает что при прямом ударе коэффициент восстановления скорости  $k$  зависит от кинетической энергии и размера частицы, а также от твердости материала преграды, модуля упругости и коэффициента Пуассона соударяемых тел.

Приемлемость аналитических зависимостей (7) и (8) в расчетной практике была подтверждена сравнением с данными экспериментальных исследований [6, 12] при ударе стального шарика с плоской поверхностью материала преграды для следующих условий опыта: диаметр шарика  $d = 10^{-3}$  м; масса  $m = 4,09 \cdot 10^{-6}$  кг; угол атаки  $\alpha = 90^\circ$ ; скорость шарика  $v_0 = 22,7$  м/с; материал преграды – сталь 45 в нормализованном состоянии (197HV или  $HB \approx 1030$  МПа); упругие характеристики контактируемых материалов:  $E_1 = E_o = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu_1 = \mu_o = 0,3$ . Расчеты показали достаточно хорошую сходимость результатов определения коэффициента восстановления скорости  $k$  при ударе, полученных теоретически и экспериментально:  $k_{расч} = 0,475$  и  $k_{эксп} = 0,458$ .

Таким образом, не проводя трудоемкие экспериментальные исследования, можно с высокой степенью достоверности определить коэффициент восстановления скорости  $k$  при

## MECHANICS

ударе расчетным методом по зависимости (7) или (8). Важность данного параметра контактного взаимодействия при ударе твердых тел объясняется тем, что позволяет рассчитать энергию удара  $W_{уд}$  по зависимости (5) как абсолютное изменение кинетической энергии дроби при дробеударной обработке:

$$W_{уд} = \Delta W = W_o(1 - k^2) \quad (9)$$

Выражение (9) для энергии удара является исходным при термодинамическом анализе процесса контактного взаимодействия твердых тел, имеющего место при дробеударном упрочнении ответственных деталей машин. Основываясь на выражении (2), первый закон термодинамики для определения энергетического состояния в поверхностном слое упрочняемой детали при дробеударной обработке можно представить в виде

$$W_{уд} = Q + \Delta U = Q + U_s \quad (10)$$

Скрытая энергия  $U_s$  деформации является ценным информативным показателем контактного взаимодействия тел и представляет научный интерес по нескольким причинам: для исследования процесса пластического деформирования; для количественного анализа физико-механической природы деформационного упрочнения металлов; для исследования процессов восстановления в поверхностном слое деталей.

Термодинамический анализ механической обработки дробью предусматривает прежде всего выполнение баланса энергии при соударении шара с плоской поверхностью обрабатываемой детали в виде отдельных и завершенных этапов его движения.

Первый этап характеризуется упругим внедрением шара в обрабатываемое тело на некоторую глубину  $h_1$  (рис.4,а). При этом кинетическая энергия  $W_1$  шара затрачивается на упругую деформацию  $W_y$ , контактное трения  $W_{тр.1}$  в стыке между шариком и деформируемым телом, волновую энергию  $W_v$ , распространяющуюся вглубь поверхностного слоя металла.

Следующий этап начинается пластическим внедрением шара, если интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в центральной зоне контакта достигает предела текучести  $\sigma_T$ , т.е. выполняется условие текучести – начала пластической деформации металла:  $\sigma_i \geq \sigma_T$ . В процессе пластической деформации обрабатываемого материала шарик внедряется до глубины  $h_2$  (рис.4,б) и глубина пластического внедрения составит  $\Delta h = h_2 - h_1$ . Энергия  $W_2$  на этом этапе затрачивается на пластическую деформацию  $W_{пл}$  и трение между шариком и деформируемым телом  $W_{тр.2}$ .

Глубина  $h_2$  приобретает максимальное значение в момент полной остановки шара, когда его скорость  $v_0 = 0$ .

Третий этап контактного взаимодействия характерен тем, что происходит частичное восстановление упруго-пластической зоны деформирования на некоторую величину  $h_3$  за счет энергии  $W_3$  упруго напряженного металла (рис.4, в). Оставшаяся часть этой энергии передается шару и вследствие чего он отскакивает от поверхности тела, затрачивая при этом энергию  $W_{от}$  на разрыв временной связи (адгезионного сцепления) между контактирующими телами.

С учетом приведенного запишем баланс энергии шара в общем виде по рассмотренным этапам (внедрения в тело до момента полной остановки и отскока):

$$W_o = W_1 + W_2 + W_3 = W_{уд} + W_{от} \quad (10)$$

где  $W_{уд}$  – энергия удара, равная  $W_1 + W_2$ ;  $W_{от} = W_3$  – энергия отскока.

Составив разницу кинетической энергии шара в момент удара  $W_o$  и энергией отскока  $W_{от}$ , получим общий баланс энергии, затрачиваемой на удар  $W_{уд}$ :

$$W_{уд} = W_o - W_{от} \quad (11)$$

Рассмотрим все составляющие энергии удара  $W_{уд}$ :

$$W_{уд} = W_{y,пл} + W_{тр} + W_v, \quad (12)$$

где  $W_{y,пл}$  – энергия, затрачиваемая на упруго пластическую деформацию поверхностного слоя и равная  $W_{y,пл} = W_{y,1} - W_{y,3} + W_{пл}$ ;



## MECHANICS

$W_{тр}$  – энергия, расходуемая на контактное трение и адгезионное сцепление, равная  $W_{тр} = W_{тр.1} + W_{тр.2} + W_{сц.}$

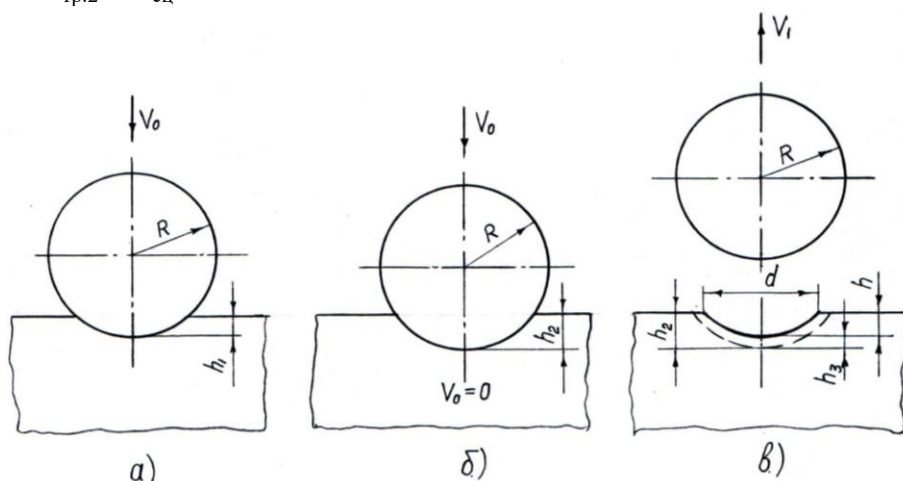


Рис. 4. Кинетика контактного взаимодействия при ударе твердой частицы по поверхности материала: а – упругое внедрение шара; б – пластическое внедрение; в – отскок шара от поверхности ( $d$  и  $h$  – размеры отпечатка - лунки)

В выражении (12) можно пренебречь энергетическими потерями в виде  $(W_{тр} + W_{в})$ , так как их значения составляют 1...3% по данным [7-9]. Следовательно, можно предположить, что энергия удара  $W_{уд}$  равна энергии, затрачиваемой на упруго пластическую деформацию  $W_{у.пл}$  поверхностного слоя металлического тела и в дальнейшем трансформирующейся в

тепловую  $Q$  и скрытую энергию  $U_s$  деформации.

В соответствии с основными принципами построения структурно – энергетической модели [10] формирования качества поверхностного слоя деталей и на основе рассмотрения баланса энергии заключаем, что при дробеударном упрочнении с помощью термодинамического анализа процесса пластической деформации металла скрытую (запасенную) энергию можно определить по зависимости

$$U_s = \Delta U = W_{уд} - Q$$

Скрытая энергия деформации аккумулируется в значительно меньших по сравнению с тепловой энергией объемах и поэтому ее удельные выражения приобретают достаточно высокие значения, соизмеримые с таковыми при традиционных термических обработках. Зная уровень удельной скрытой энергии деформации  $U_s$ , можно рассчитать интенсивность остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала по полученной нами модифицированной формуле Фриделя:

$$\sigma_{ост} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{2}} \cdot \sqrt{U_s}, \quad (14)$$

где  $E$  – модуль упругости, Н/мм<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

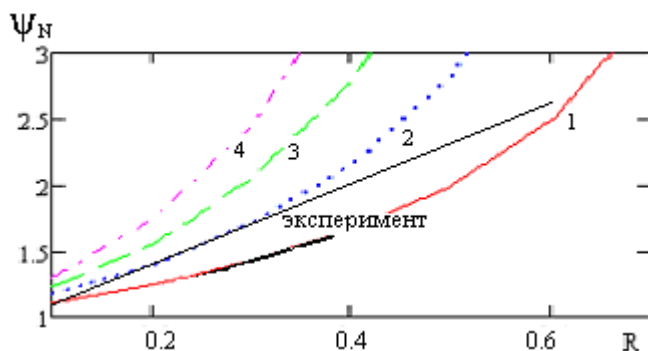
Интенсивности остаточных напряжений, которые характеризуют соответствующую энергию и являются основным параметром качества обработанной поверхности, ответственным за долговечность и усталостную прочность деталей машин при действии знакопеременных нагрузок [11].

При дробеударном упрочнении зубьев пильного диска для волокноотделительных машин в их поверхностном слое в зависимости от глубины  $z=0,05; 0,1$  и  $0,2$  мм расчетные значения интенсивности остаточных напряжений соответственно составили  $\sigma_{ост}=1094; 1082$  и  $933$  Н/мм<sup>2</sup>.

Полученные теоретические значения интенсивности остаточных напряжений использованы в прогнозной оценке долговечности и усталостной прочности пильных дисков хлопковых машин с учетом эксплуатационных нагрузок. Производственные испытания джидных пил с упрочненными после дробеударной обработки показали увеличение их долговечности в пределах 1,3...2,0 раз в зависимости от уровня сжимающих остаточных напряжений. Из рис.5 следует, что результаты экспериментальных исследований долговечности упрочненных джидных пил в условиях хлопкозавода хорошо согласуются с зависимостью Биргера при  $m=3$ .



## MECHANICS



1-  $m=2$ ; 2-  $m=3$ ; 3-  $m=4$ ; 4-  $m=5$  для модели Биргера  
Рис. 5. Зависимость относительной долговечности  $\psi_N$  от коэффициента остаточных напряжений  $R$  при различных значениях  $m$ .

Получена линейная зависимость, позволяющая прогнозировать относительную долговечность деталей в зависимости от отношения интенсивности остаточных напряжений  $\sigma_{\text{ост}}$  и предела прочности  $\sigma_B$  материала

$$\psi_N = 3,125R + 0,75, \quad (15)$$

где  $R = \sigma_{\text{ост}} / \sigma_B$ .

Таким образом, выполнен анализ энергетических соотношений при дробеударном упрочнении на

основе баланса энергии и кинетики контактного взаимодействия в процессе соударения шара с плоской поверхностью тела в виде отдельных завершённых этапов его движения. Термодинамический подход представляется наиболее обоснованным при оценке и квалитметрии поверхностного слоя деталей, характеризующегося комплексом физико-механических и геометрических параметров после финишной размерной и отделочно-упрочняющей механической обработки ответственных деталей машин и механизмов.

## References

- [1]. Новиков, И.И. Термодинамика [Текст]/И.И.Новиков. – М.: Машиностроение, 1984. – 592 с.
- [2]. Мартин, Дж. Стабильность микроструктуры металлических систем [Текст]/ Дж. Мартин, Р.Доэрти. Пер.сангл. – М.: Атомиздат, 1978. – 260 с.
- [3]. Мак Лин, Д. Механические свойства металлов [Текст]/ Д. Мак. Лин. – М.: Metallurgy, 1965. – 431 с.
- [4]. Бауман, В.А. Роторные дробилки [Текст]/ В.А.Бауман. – М.: Машиностроение, 1973. – 142 с.
- [5]. Джураев, А.Д. О коэффициенте восстановления скорости при ударе твердой сферической частицы о плоскую металлическую преграду [Текст]/ А.Д.Джураев, И.Г.Шин // Изв.ВУЗов. Техн.науки. – Ташкент, 1995. - №1-4. –С. 121-129.
- [6]. Виноградов, В.Н. Экспериментальное исследование кинематических параметров удара шара о плоскую поверхность материала / В.Н.Виноградов, В.И.Бирюков, С.И.Назаров, И.Б.Червяков // Трение и износ. – 1981. – Т.2. №4. – С. 584-588.
- [7]. Батуев, Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов [Текст]/ Г.С.Батуев. – М.: Машиностроение, 1977. – 239 с.
- [8]. Шин, И.Г. Технологические методы обеспечения качества и прогнозирования долговечности деталей машин первичной обработки хлопка [Текст]: автореф. дис... докт.техн. наук / И.Г.Шин. – Ташкент: ТИТЛП, 2014. – 90 с.