

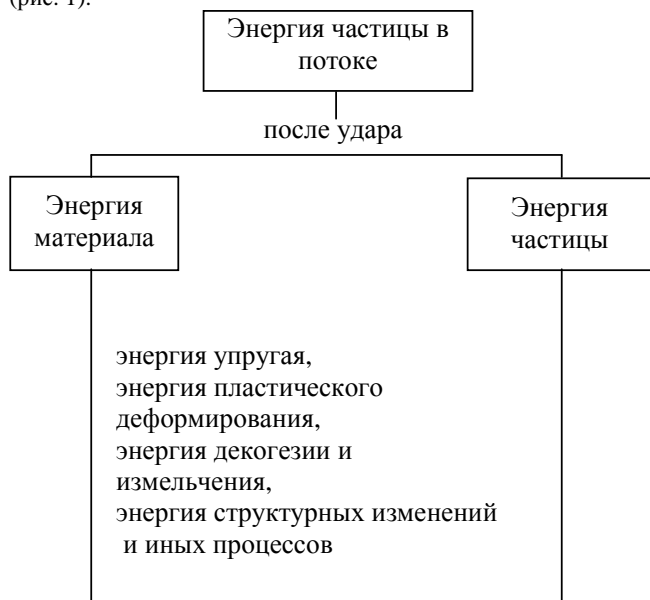
5. Sharma J. N., Singh H. Generalized thermoelastic waves in anisotropic media // J. Acoust. Soc. Am. – 1989. – Vol. 85, № 4. – P. 1407 – 1413.
6. Sharma J. N., Singh H. Propagation of generalized thermoelastic waves in cubic crystals // Arch. Mech. – 1990. – Vol. 42, № 1. – P. 19–30.
7. Таблицы физических величин. Справочник. Под редакцией И. К. Кикоина. – Москва: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
8. Современная кристаллография. Физические свойства кристаллов. – Москва: Наука, 1984. – 584 с.
9. Хантингтон Г. Упругие постоянные кристаллов // УФН. – 1961. – Т. 74, № 3. – С. 461–520.
10. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Т. IV, ч. 2. — Москва: Наука, 1981. – 552 с.
11. Босьяков С. М. Метод характеристик в динамических задачах механики деформируемого твердого тела: Автореф. дис. ... канд. физ. – мат. наук. Мн.: БГУ, 2002. – 21 с.

УДК 620.179.112(075.8)

**Крупич Б.**

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ГАЗОАБРАЗИВНУЮ ЭРОЗИЮ СТАЛИ 40Х

**Введение.** Эрозионный износ элементов вентиляционных машин требует от конструкторов соответствующего выбора конструкционных материалов. Скорость эрозии определяется основными тремя факторами: свойства подверженного эрозии материала и материала атакующих частиц; кинетическая энергия частиц; вид среды, в котором происходит процесс. Энергия ударяющей частицы подлежит преобразованию [1] (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема преобразования энергии частицы.

В заданных условиях эксплуатации известен удельный расход пролетающих частиц  $\dot{m}$ , определяемый как

$$\dot{m} = \frac{\partial}{\partial A} \left( \frac{\partial m}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где  $m$  – масса частиц в потоке;  $A$  – площадь сечения потока;  $t$  – время.

Конструктора интересует, прежде всего, интенсивность износа  $I_v$  элемента конструкции

$$I_v = \frac{dV_z}{dt} = \alpha \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

где  $V_z$  – объем материала как продукт эрозии,  $h$  – глубина эрозии,  $\alpha$  – коэффициент.

Интенсивность изнашивания  $I_v$  является величиной, характерной для данного материала и условий процесса эрозии. Чаще всего она определяется экспериментально.

**Критерии эрозионного износа.** Критерии возникновения эрозии и ее дальнейшего протекания обсуждаются в работах [2-10]. Финни [2] устанавливает зависимость объема удаленного материала  $V_z$  от кинетической энергии частицы, угла падения и удельного сопротивления отрыву.

Биттер [3] подразделяет износ  $V_z$  на  $V_D$  – связанный с нормальной составляющей скорости к поверхности материала и  $V_C$  – соответствующей касательной составляющей скорости. Устанавливает также составляющие скорости,  $K$  – нормальной и  $V_p$  – касательной, ниже которых не наблюдается эрозионный износ.

Беккманн [4] вводит в рассмотрение удельную энергию среза, которая является отношением работы сил резания к удаленному объему материала. Погодаев [5] предлагает параметр  $w_{кр}^*$ , который определяет скорость потока энергии частиц, отнесенной к единице объема удаленного материала.

Филд и Гатчингс [6] используют безразмерный параметр  $D$ , который является отношением энергии частицы единичного объема к пределу текучести материала.

Сорокин [7, 8] полагает, что критерий стойкости к абразивному изнашиванию стали должен учитывать одновременно ее прочность и пластические свойства. При анализе процесса абразивного изнашивания большое значение придается растягивающим напряжениям, возникающим во время перемещения углубленной частицы абразива. Величина углубления зависит от твердости материала.

Хачатурян [9] использует модуль пластичности  $D$ , вычисляемый на основе данных из опытов на одноосное растяжение, т.е.

$$D = \frac{S_k - \sigma_T}{l_k}, \quad (3)$$

где  $S_k$  – истинное напряжение разрыва;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $l_k$  – истинные деформации в момент разрушения образца. Чем больше модуль, тем больше стойкость к эрозии.

Петров [10] записывает критерий начала эрозии в виде

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(s) ds \leq \sigma_s \tau, \quad (4)$$

где  $\sigma_s$  – прочность при растяжении;  $\tau$  - время до начала эрозии;  $\sigma(s)$  – максимальные напряжения.

Во время газоабразивной эрозии поверхность материала подвергается пластическим деформациям. Они вызывают не только его упрочнение, но и развитие повреждений структуры. Когда материал теряет способность для дальнейших пластических деформаций, то происходит декогезия частичек материала. Локальное напряженное состояние в поверхностном слое материала во время эрозии является сложным в отличие от напряженного состояния при одноосном растяжении. Если можно применить постулат теории пластичности [11] о существовании единой кривой интенсивности деформаций материала в зависимости от интенсивности напряжений, то результаты, получаемые из опытов на одноосное растяжение можно распространить на условия эрозионного разрушения [9]. Если поток частиц перпендикулярен поверхности материала, то наибольшие растягивающие напряжения возникают на окружности контакта частицы и материала. Эти напряжения являются растягивающими.

Поочередно происходящие удары частиц приводят к возникновению деформационно упрочненного поверхностного слоя материала. Эффект этот проявляется увеличением микротвердости [5].

**Цель работы** – исследовать влияние деформационного упрочнения, вызванного одноосным растяжением или обкаткой шаром, на эрозию стали 40X.

**Образцы для исследований.** Для испытаний на газоабразивную эрозию использовано три вида образцов: 1- образцы, не подверженные предварительному деформированию; 2- образцы, подверженные остаточным деформациям 1,4; 7,0; 21,2 %, полученным при одноосном растяжении усилием соответственно 50, 60 и 70 кН (схема образца представлена на рис.1); 3 – образцы, подвергнутые обкатке шаром – достигнуто вдавливание 0,1; 0,3 и 0,5 мм при помощи шаровой головки для обкатки. Образцы для обкатки в виде кружков диаметром 50мм и толщиной 5 мм были выбраны из прутка того же самого диаметра. Диаграмма испытаний на статическое растяжение образца представлена на рисунке 2. Все образцы после измерения твердости были подвержены воздействию потока твердых частиц. Ось потока абразива и направление растяжения образца находились в плоскости, перпендикулярной к плоскости образца.

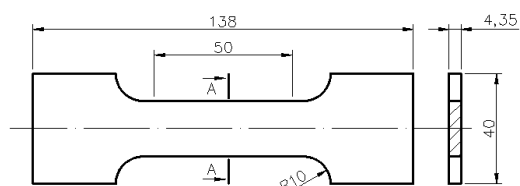


Рис. 2. Схема образца.

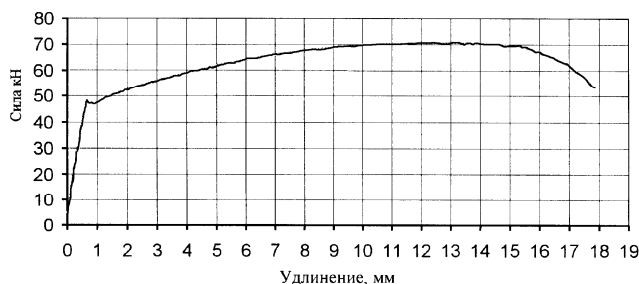


Рис. 3. Диаграмма статического растяжения образца.

Результаты измерения твердости отдельных видов образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения твердости образцов стали 40X

Сталь 40X	Растянутые образцы			
Максимальное усилие растяжения, кН	0	50	60	70
Твердость, HV	198	206	214	223
Сталь 40X	Обкатанные образцы			
Глубина вдавливания при обкатке, мм	0	0,1	0,3	0,5
Твердость, HV	223	238	245	245

Из данных, содержащихся в таблице 1 следует, что как постоянная пластическая деформация образцов методом растяжения, так и динамическое упрочнение (обкатка) вызывают увеличение твердости. В динамически упрочненных образцах (обкатка) образуется поверхностный слой с различающейся степенью остаточных деформаций по высоте слоя. Измеренная твердость этого слоя является определенной условно-осредненной величиной, т.к. на глубине отпечатка и в верхнем слое остаточные деформации и локальная твердость различаются между собой. Твердость образцов в местах обкатки была больше в сравнении с не обкатанными образцами. Одинаковая, осредненная твердость обкатанных образцов при обкатки 0,3 и 0,5 мм может свидетельствовать об одинаковых пластических свойствах поверхностных слоев тех образцов.

**Исследовательское оборудование.** Каждый образец был подвержен эрозии при помощи потока кварцевого песка с размером зерна до 0,2 мм в течение 5 мин на устройстве, показанном на рисунке 4. По истечении каждой 1 мин производились измерения потери массы образца и использованного песка. Сопло выхода потока песка находилось на расстоянии 6 мм от поверхности образца. Давление воздуха, сообщаемое кинетическую энергию зернам песка, было равно 0,5 МПа. Скорость вылетающих зерен песка составляла ~58 м/с, что вызывало износ 630 г/мин. В работе представлены результаты испытаний образцов при углах падения потока частиц  $\alpha=30^\circ$  и  $90^\circ$ .

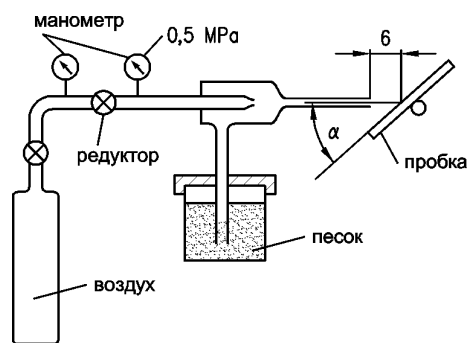


Рис. 4. Схема установки для испытаний на эрозию.

**Результаты эрозии деформационно упрочненных образцов.** Результаты испытаний на эрозию предварительно пластически деформированных методом растяжения образцов при углах падения потока  $\alpha=30^\circ$  и  $90^\circ$  представлен на рисунке 5.

Экспериментальные точки группируются около прямых линий. Чем больше была предварительная пластическая деформация, а тем самым и деформационное упрочнение, тем была больше скорость эрозии.

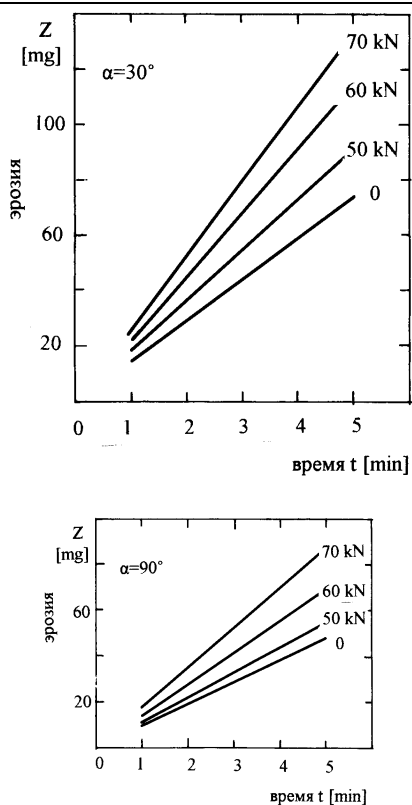


Рис. 5. Зависимость массового износа стали 40X от времени при давлении воздуха 0,5 МПа, расходе песка 630 г/мин, предварительной силе растяжения 0; 50; 60; 70 кН, для угла падения частиц: а) 30°; б) 90°.

Жуховски [12] для сравнения степени повреждения разных материалов вычисляет коэффициент  $D_w$ , названный повреждением

$$D_w = 1 - \frac{W_1}{W_0} \quad (5)$$

где  $W$  – удельная работа деформации до разрушения образца из материала не нагруженного ( $W_0$ ) и подвергнутого силовому воздействию ( $W_1$ ). Элемент, материал которого получил критическую степень  $D_w=1$ , разрушается. Степень повреждения отдельных образцов перед эрозией, рассчитанная согласно уравнению (5), представлена в таблице 2.

Таблица 2. Значения параметров повреждения  $D_w$

$\epsilon_{pl}, \%$	0	1,4	7,0	11,6
$D_w$	0	0,17	0,33	0,85

Здесь очевидна корреляция между стойкостью материала к эрозии и параметром повреждения  $D_w$ . Однако этот параметр не позволяет сравнивать между собой двух разных материалов, различающихся только удельной работой  $W_0$ , если не удастся определить удельной работы  $W$  их верхних слоев.

Газоабразивной эрозии способствует всегда пластическая деформация и упрочнение поверхностного слоя материала. Когда исчерпана возможность дальнейших пластических деформаций, то происходит развитие повреждений, сопровождающееся отделением частичек материала, которые составляют продукт эрозии. Увеличение скорости эрозии образцов вместе с увеличением пластических деформаций, полученных

при растяжении, подтверждает синергетическую роль растягивающих контактных напряжений в этом процессе.

При статических циклических осевых нагружениях растянутых образцов всегда продолжается упрочнение до самого разрушения. Это означает, что модуль пластичности  $D$ , согласно уравнению (3), не зависит предварительного упрочнения. В связи с этим может быть применен критерий Хачатуряна для рассматриваемых образцов с предысторией деформирования.

**Результаты эрозии обкатанных шаром образцов.** Результаты эрозии обкатанных шаром образцов представлены на рисунке 6.

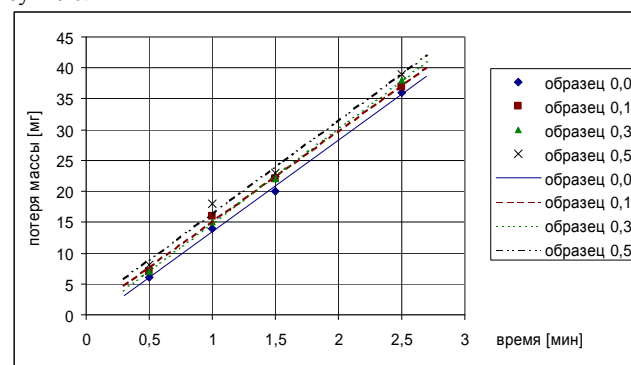


Рис. 6. Зависимость потери массы от времени стали 40X, упрочненной методом обкатки шаром. Угол атаки 60°, давление воздуха 0,5 МПа, расход абразива  $\dot{m} = 12,5 \text{ г}/(\text{мин} \cdot \text{мм}^2)$ .

Данные на рис.6 показывают, что кривые износа поверхностно упрочненных образцов и «сырого» образца в пределах ошибки совпадают между собой. Это означает, что скорость эрозии всех образцов одинакова и подтверждает более ранние утверждения иных авторов [13, 14] о независимости скорости эрозионного износа от предварительного поверхностного упрочнения. Чем больше величина внедрения шара, тем больше значение износа (рис.6). Это вызвано более кратким временем инициации возникновения износа в образцах с большим углублением шара при обкатке.

**Выводы.** Представленные результаты исследований указывают на существенную роль растягивающих напряжений в процессе возникновения эрозионного износа. Предварительные пластические деформации, вызванные в объеме материала путем одноосного растяжения, приводят к увеличению скорости эрозии. Падающие на материал частицы абразива требуют меньше времени на исчерпание пластических деформаций. Проявляется это увеличением скорости эрозии вместе с увеличением предварительных деформаций.

Поверхностное упрочнение методом обкатки шаром приводит к возникновению пластически деформированного поверхностного слоя. Большому значению внедрения шара соответствует большая деформация, но это не влияет на скорость эрозии. Поэтому следует допустить, что поверхностный слой, подвергаемый в дальнейшем воздействию потока частиц, имеет подобные свойства независимо от степени вдавливания шара. Состояние этого слоя, при котором начинается эрозия, достигается раньше в образцах, подверженных большему обкату.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Uetz H., Gommel G.: Temperaturerhöhung und elektrische Aufladung beim Stoss einer Stahlkugel gegen eine Stahlplatte, Wear 9, t. 4, 282-296, 1966.

2. Finie J.: Erosion of Surface by Solid Particle, Wear 3, 87-103, 1960.
3. Bitter J. G. A.: Study of Erosion Phenomena, Wear 6, Part I pp.5-21, Part II pp. 169-190.
4. Beckmann G., Gotzmann H.: Strahlverschleiss von Metall-Modelierung und Berechnung, IMZ-MIP-77-95, Ingenierhochschule Zittau, 1-52, 1997.
5. Погодаев Л. И., Шевченко П. А.: Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования, Судостроение, Ленинград 1984.
6. Field J. E., Hutchings I. M.: Impact erosion processes, Proc.3rd Conf. Mech. Prop. Hingh of Strain (Oxford 1984, Inst.Phys. Conf.Ser. No 70) pp. 349-371.
7. Сорокин Г. М.: Основы механизма изнашивания сталей абразивом с позиции металловедения, Трение и износ. Т. 11, № 6,1117-1123, 1990.
8. Сорокин Г.М., Сафонов Б. П., Бегова А. В.: Критерии выбора сталей применительно к абразивному изнашиванию, Трение и износ. Т. 24, № 1, 80-84, 2003.
9. Хачатурян С. В. Связь относительной износостойкости при абразивном изнашивании с модулем пластичности металлов, Трение и износ. Т. 12, № 1, 136-143, 1991.
10. Morozow N.F., Petrow Yu. V., Smirnov V. I.: Transition between Brittle and Ductile Erosional Fracture, Doklady Physics, Vol.47. No. 7, pp.525-527,2002.
11. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести, Москва 1975.
12. Zuchowski R.: Ocena stopnia uszkodzenia materialu na podstawie zmian wlasnosci fizycznych, Dozor techniczny т. 22, nr3, 97-101, 1984, т. 23, nr 3-4, 106-108,1985.
13. Лаврентьев А. И.: К вопросу о независимости абразивного изнашивания от наклепа, Трение и износ. Т. 7, № 4, 654-660, 1986.
14. Алексеев П.Г.: Влияние упрочнения наклепом на износостойкость и надежность деталей машин, Трение и износ. Т. 18, № 3, 301-310, 1997.

УДК 621.833

Марчук А.С.

## АНАЛИЗ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ

Перспективным направлением повышения несущей способности и снижения виброактивности зубчатых передач является применение передач с коэффициентом перекрытия  $\varepsilon > 2$  [1,2]. Однако с увеличением коэффициента перекрытия возрастает опасность чрезмерного падения изгибной прочности отдельного зуба, что может привести, при определенных условиях, к его излому. Поэтому, для этих передач, особенно важным является вопрос правильного выбора параметров зубьев.

Наиболее эффективным методом конструирования нестандартных эвольвентных зубчатых передач (каковыми являются практически все прямозубые передачи с  $\varepsilon > 2$ ) является метод проектирования в обобщающих параметрах [3]. Данный метод предусматривает проектирование передачи в два отдельных этапа: 1)определение параметров зубцов (зубьев без переходных кривых), инвариантных к параметрам инструмента; 2)определение параметров производящего инструмента не изменяющих форму и размеры рабочих поверхностей и непосредственно влияющих на вид переходной кривой, который существенно определяет изгибную прочность зуба. Такой подход обеспечивает определение близкой к оптимальной геометрии зуба, значительно упрощает анализ. Основные аспекты рационального выбора параметров зубцов, согласно этому методу, изложены в работе [3]. Настоящая статья рассматривает вопрос второго этапа проектирования в этом методе – определения оптимальной геометрии зуба инструмента и, соответственно, переходной кривой зуба зубчатого колеса.

Предлагаемая методика подразумевает разработку зуборезного инструмента отдельно для шестерни и колеса, поэтому в дальнейшем под параметрами без индексов  $_{1,2}$  понимается любое зубчатое колесо.

Зададимся некоторыми обобщающими параметрами зубчатого колеса, определенными на первом этапе ( $\vartheta_{1,2}$  – углы профиля в точке заострения зубцов для шестерни и колеса,  $m_{a1,2}$  – параметры, характеризующие толщину зубьев на

окружности вершин,  $\alpha_{p1,2}$  – углы профиля входа зубьев в зацепление,  $r_{b1,2}$  – радиусы основных окружностей,  $z_{1,2}$  – числа зубьев). Тогда оптимизировать в инструменте можно угол профиля, функцию, описывающую скругление зуба, и ее параметры. Функций и их параметров, подходящих для описания скругления зуба инструмента существует бесконечное множество, поэтому ограничимся несколькими наиболее простыми и известными, причем их параметры должны однозначно определяться углом профиля (который в этом случае является единственной оптимизируемой величиной для исследуемой функции). Этими функциями, к примеру, возьмем (предлагаемая методика легко распространяется на аналогичные математические кривые):

- а) уравнение окружности;
- б) уравнение параболы;
- в) уравнение синусоиды, проходящей в 0-ой фазе через точку инструмента, соответствующую углу профиля входа зуба в зацепление ( $\alpha_p$ ).

Все функции применим в варианте с полным скруглением вершины зуба, при переменном, таким образом, коэффициенте радиального зазора. Это обеспечит, вероятнее всего, наиболее плавное изменение радиуса кривизны галтели. Оптимизацию будем проводить по критерию минимума изгибного напряжения, возникающего от действия силы, приложенной в вершине зуба. Максимальное напряжение изгиба в галтели определяется с помощью гипотезы неплоских сечений, которая дает погрешность, по данным различных источников, от 4 до 15%. Такая неточность на этом этапе проектирования допустима, т.к. оценивается не величина, а качественное соотношение напряжений в рассматриваемых вариантах.

Для определения геометрии переходной кривой принимаем две системы координат – неподвижную  $XOY$ , связанную с зубчатым колесом, и подвижную  $Y_uO_uX_u$ , связанную с полодной прямой инструмента (ось  $O_uY_u$ ), как показано на рис.1,