

## УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ И УСКОРЕННАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЯ

Вдовин В. Д. /к. т. н./

Національна металургічна академія України

*Поверхневе пластичне деформування сприяє значному підвищенню довговічності деталі, надійності роботи машин і механізмів. Наші дослідження в області поверхневого пластичного деформування дозволили визначити: глибину наклепу без руйнування деталі [1]; діапазон раціональних значень глибини наклепу [2]; твердість металу без урахування добавки від наклепу ("справжню твердість") [5]; запропонувати прискорені методи контролю межі витривалості деталі [7] і спосіб прискореної оцінки втомних характеристик виробу [8]. Спосіб дозволяє прогнозувати повну вірогідну криву виробу за результатами прискореного контролю пари зразків. Такі криві дають можливість вибирати матеріали і технології обробки для підвищення надійності виробів. Результати досліджень впроваджені і визнані винаходом, опубліковані, поширюються в зарубіжних виданнях.*

**Ключові слова:** метал, зміцнення, наклеп, пластичне деформування, довговічність, механізм

*Surface plastic deformation contributes significantly to the durability of parts, reliability of machines and mechanisms. Our research in the field of surface plastic deformation possible to determine: hardening depth without destroying the parts [1]; the range of rational values of the depth of hardening [2]; metal hardness, excluding additions from hardening ("real hardness") [5]; offer accelerated fatigue limit testing methods detail [7] and the method of rapid assessment of the fatigue characteristics of the product [8]. The method allows predicted the full probability curve of the product as a result of the accelerated control pairs of samples. These curves make it possible to select materials and process technology to enhance product reliability. The research results are implemented and recognized by the invention, published, distributed in foreign publications.*

**Key words:** metal, hardening, cold-hardening, plastic deformation, durability, mechanism

*Поверхностное пластическое деформирование способствует значительному повышению долговечности детали, надежности работы машин и механизмов. Наши исследования в области поверхностного пластического деформирования позволили определить: глубину наклепа без разрушения детали [1]; диапазон рациональных значений глубины наклепа [2]; твердость металла без учета добавки от наклепа ("истинную твердость") [5]; предложить ускоренные методы контроля предела выносливости детали [7] и способ ускоренной оценки усталостных характеристик изделия [8]. Способ позволяет прогнозировать полную вероятностную кривую изделия по результатам ускоренного контроля пары образцов. Такие кривые дают возможность выбирать материалы и технологии обработки для повышения надежности изделий. Результаты исследований внедрены и признаны изобретением, опубликованы, распространяются в зарубежных изданиях.*

**Ключевые слова:** металл, упрочнение, наклеп, пластическое деформирование, долговечность, механизм

*В статье кратко представлен обзор отдельных работ, проведенных автором в области пластического деформирования и контроля усталостной прочности деталей машин.*

Повышение надежности и долговечности машин всегда является актуальной задачей для исследователей и разработчиков. Большая часть выхода из строя машин и механизмов связана с усталостным разрушением их деталей. В статье представлены оправдавшие себя, и актуальные для развития, способы, методы и конструктивные решения повышения долговечности элементов машин и изделий поверхностным пластическим деформированием (ППД), способы контроля эффективности упрочнения и разработок новых материалов и технологий.

Упрочнение ППД характеризуется появлением наклепанного слоя и остаточными напряжениями в детали. Глубину наклепа валов после ППД мы предложили определять неразрушающим способом при измерении твердости упрочненной и не упрочненной поверхности [1]. Способ был апробирован и внедрен при контроле упрочнения валов на металлургических заводах и морских судов.

Остаточные напряжения, возникающие в результате ППД, распространяются по всему объему упрочненной зоны. В поверхностной зоне-сжимающие, внутренние слои растянуты. Мы показали оптимальное соотношение этих зон. Превышение допустимой величины зоны наклепа приводит к снижению усталостной прочности при циклических нагрузках изгибного характера [2].

При исследовании процессов ППД было обращено внимание на особенности современных способов определения твердости. Результаты, получаемые при внедрении индентора, показывают твердость с добавкой от наклепа. Эта добавка не постоянна, она зависит от особенностей металла и его состава. Нами была предложена методика оценки добавки от наклепа и формула расчета величины "истинной твердости" [3].

Распределение давления по поверхности пластического отпечатка показано на рис. 1.

Схема к расчету представлена на рис. 2, где:  $OA=HV_{исх}$  – твердость по Виккерсу исследуемого (не наклепанного) материала;  $OB=HV_{max}$  – твердость по Виккерсу в нижней точке шарового отпечатка;  $O_1A = O_1B = R_H$  – радиус, которым описывается поверхность твердости.

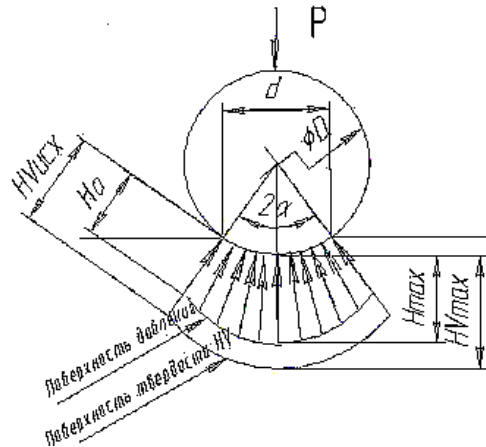


Рис. 1. Схема, имитирующая определение твердости по Бринелю

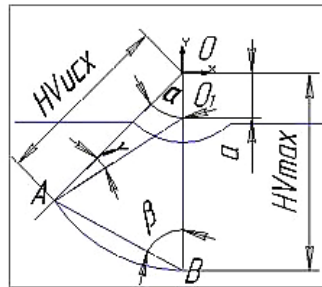


Рис. 2. Схема к расчету

Здесь не приводятся промежуточные выкладки, но показано выражения добавки от наклепа:

$$\Delta H = \frac{0,6 \cdot \left[ a(1 - \cos^3 \alpha) + \frac{R^3 H - (\sqrt{R^2 H - a^2 \cdot \sin^2 \alpha})^3}{a^2} \right] \cdot \frac{P}{\pi \cdot R^2}}{\sin^2 \alpha}$$

Таким образом, величина твердости не наклепанного металла, "истинная твердость" равна:

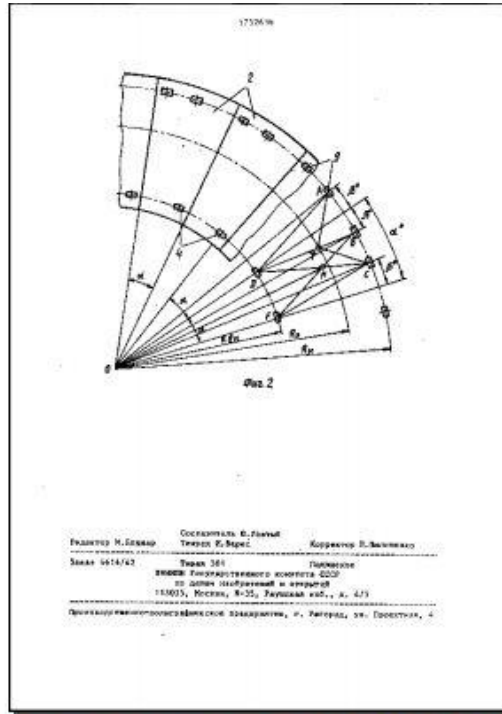
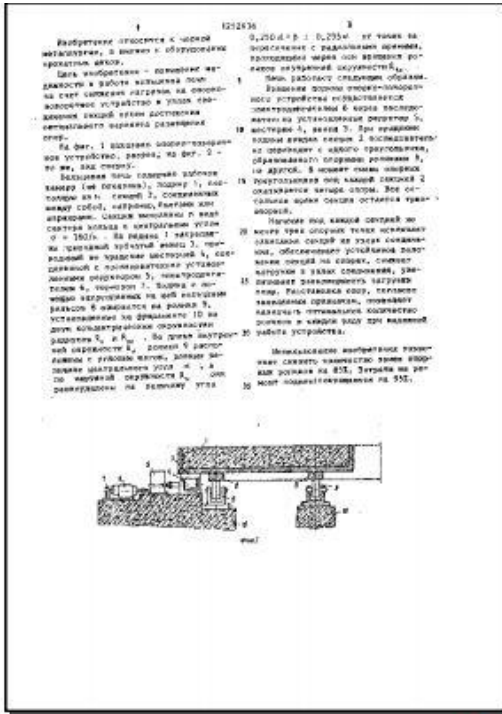
$$H_0 = HV_{исх} - \Delta H.$$

При исследовании и совершенствовании многоопорных конструкций, на примере кольцевых нагревательных печей, мы применили в качестве датчиков давления, легко деформируемые пластинки [3, 4]. Исследование изменения твердости пластинок, после локального проворота пода печи, позволило поучить картину распределения нагрузок на опоры и раму, усовершенствовать систему опор.

Приемы пластического деформирования мы использовали для разработки конструкции для удаления грата при производстве сварных труб [6].

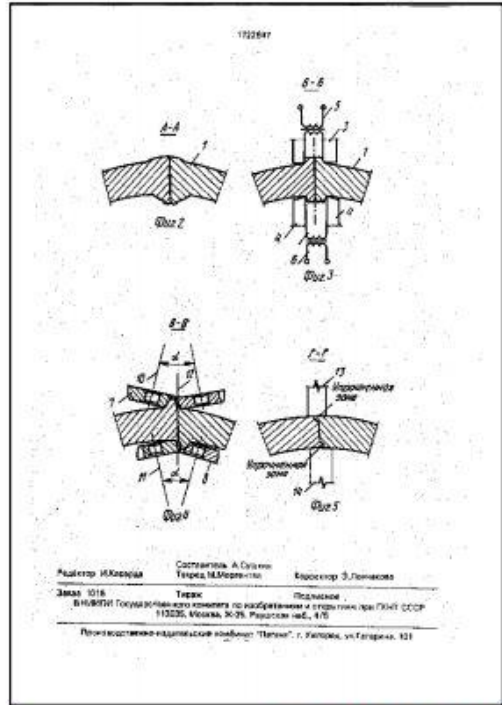
На рис. 4 неприводной зубчатый режущий дисковый инструмент пластически деформирует и срезает грат, искривляет поверхность прямолинейного шва, затрудняя возможность лавинного распространения трещины в аварийных ситуациях.

Для оценки эффективности упрочнения, подобных технологических операций и разработки новых материалов и деталей машин, необходима оценка их усталостных свойств. Мы разработали ускоренные методы контроля предела выносливости при испытании детали с нарастающей нагрузкой. Представленное ниже опубликовано в журнале [7] и книге "Новые возможности ускоренных испытаний с нарастающей нагрузкой" [8].



Drawing pages of SU1252636 A1

Рис. 3. Расположение пластин-датчиков при анализе нагрузки на опоры [4]



Drawing pages of SU1722647 A1

Рис. 4. Способ производства прямошовных труб [6]

Расчет предела выносливости при испытаниях со ступенчатым или бесступенчатым нагружением предложено вести по зависимости

$$\sigma_r = \sigma_1 + K \cdot \log\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right). \quad (1)$$

Формулы подробно описаны в цитируемых публикациях, приведены примеры.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_i}{N_i} \cdot \left[ \frac{10^{B \cdot m} - 1}{10^B - 1} \right] \quad (2)$$

Для варианта с бесступенчатым нагружением [3].

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{\left(10^{\alpha \cdot \frac{N_{max}}{K}} - 1\right)}{N_1 \cdot \alpha \cdot \frac{\ln(10)}{K}} \quad (3)$$

Продолженные нами разработки выявили связь характеристик усталостной выносливости детали с ее наработкой до разрушения при ускоренных испытаниях [7].

Наработки при ускоренных усталостных испытаниях со ступенчатым нарастанием нагрузки будет иметь вид:

$$N_{max} = \frac{K \cdot \log}{a} \left[ 1 + N_1 \cdot \left[ \left(10^{\frac{\Delta\sigma}{K}} - 1\right) \right] \cdot \frac{10^{\frac{(\sigma_r - \sigma_1)}{K}}}{n_i} \right];$$

- для испытаний с бесступенчатым нагружением:

$$N_{max} = \frac{K}{a} \cdot \log \left[ 1 + N_1 \cdot \frac{a \cdot \ln(10) \cdot 10^{\frac{(\sigma_r - \sigma_1)}{K}}}{K} \right].$$

Зная значение наработки до разрушения и предел выносливости, можно провести программный поиск кривых вероятностного поля. Последовательно, с заданным шагом, программа просмотрит уровни предполагаемых усталостных кривых этого поля с их значениями пределов выносливости, подставит последовательно различные варианты сочетаний углов наклона и точек перелома, рассчитает для каждого сочетания параметров наработку до разрушения и сравнит ее с исходной наработкой. Программа выделит такие сочетания параметров усталостных кривых, которые при подстановке в формулу наработки подтвердят, с определенным допуском, наработку при разрушении образца.

Первоначальная проверка проводилась на опубликованных результатах испытаний для построения полной вероятностной кривой усталостных испытаний литой и легированной марок сталей (рис. 5).

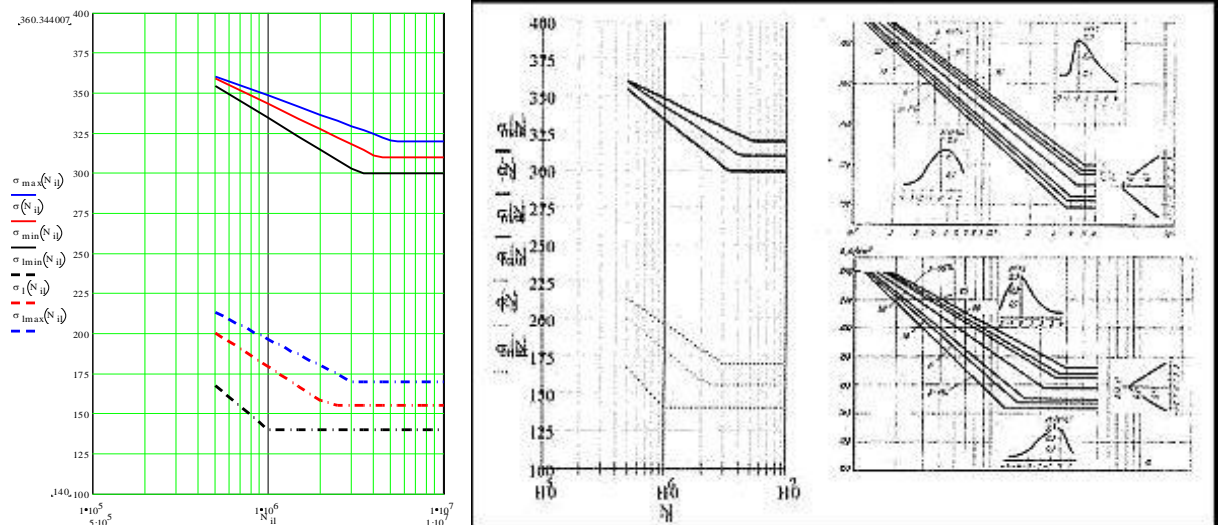


Рис. 5. На рисунках: результаты компьютерного моделирования (слева) и их сравнение с натурными испытаниями сталей 30Л (внизу) и 40ХН (вверху) [8]

Такие кривые необходимы для расчета долговечности, работоспособности деталей при различных уровнях нагрузок, выбора материала с лучшими характеристиками выносливости при работе в режиме переменного нагружения.

На рис. 6 и 7 показан прогноз полей разброса значений усталостных кривых при виртуальном моделировании на основе табличных значений пределов их выносливости из литературных источников.

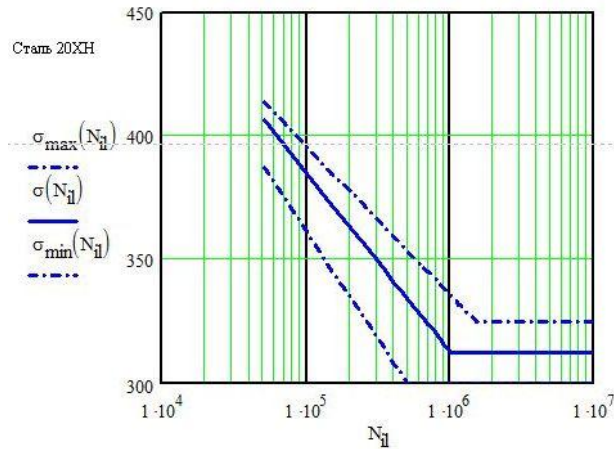


Рис. 6. Поле кривых стали 20ХН

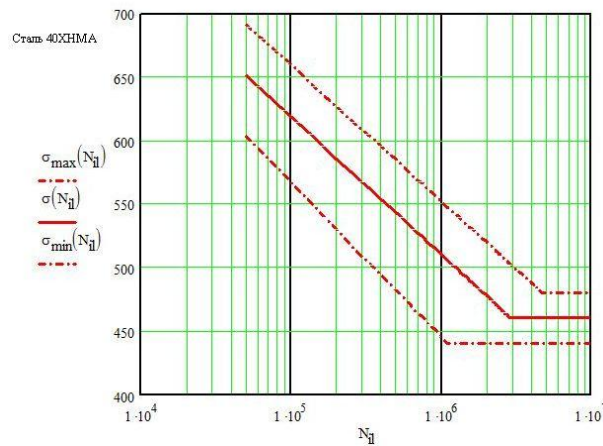


Рис. 7. Поле кривых стали 40ХНМА

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Авт. свид. СССР №415551 . Способ определения глубины наклепа. (Глубина наклепа после упрочнения поверхностным пластическим деформированием определяется неразрушающим способом по изменению твердости поверхности вала).
2. Вдовин, Валентин Дмитриевич. Исследование, прогнозирование и определение эффективности упрочнения валов поверхностным пластическим деформированием [Текст] [Текст] : автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / В.Д. Вдовин; Научн. рук. В.М. Гребеник ; ДМетИ. - Днепропетровск, 1974. - 19 с. - Библиогр.: с. 19. - (в мяжк. пер.)
3. Авт. свид. СССР №928177. Способ определения контактных давлений (Величина контактного давления связана с пластической деформацией материала основы или образца-свидетеля).
4. Кольцевая нагревательная печь  
[https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=6&ND=3&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=19860823&CC=SU&NR=1252636A1&KC=A1](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=6&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19860823&CC=SU&NR=1252636A1&KC=A1)
5. «Металлургическая и горнорудная промышленность», №6, 2006 г. «Истинная твердость» металла и контроль величины давления при пластическом деформировании, стр. 91-94.
6. [http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=SU&NR=1722647A1&KC=A1&FT=D&ND=&date=19920330&DB=&locale=en\\_EP](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=SU&NR=1722647A1&KC=A1&FT=D&ND=&date=19920330&DB=&locale=en_EP) (Способ изготовления прямошовных труб)
7. V.D. Vdovin, V.M. Grebenik A method of determining the fatigue limit in testswith step-by-step loading.  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF01528923#page-1>
8. В. Вдовин. Новые возможности ускоренных испытаний с нарастающей нагрузкой. LAP Lambert Academic Publishing, 2015 г., 76 с.