

МАШИНОСТРОЕНИЕ

И. И. ЯНКОВ, Г. Д. ПЕТРОСЯН, М. Г. СТАКЯН

ПОВЫШЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНЫ  
ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Высокая эффективность поверхностного пластического деформирования (ППД) для повышения изгибной выносливости деталей машины связана с благоприятным воздействием остаточных напряжений сжатия, глубина залегания которых, а также величина и характер их распределения по сечению детали зависят от многих факторов, действующих при упрочняющей обкатке шариками или роликами. Эффект повышения изгибной выносливости деталей машины при наличии высокой концентрации напряжений проявляется за счет торможения развития усталостных трещин [1].

В основе природы возникновения при ППД остаточных напряжений и повышения твердости металла лежат одни и те же процессы пластической деформации, поэтому можно предполагать, что между ними существует определенная связь. В настоящей работе изучен механизм упрочнения и разупрочнения металлов и на основе этого рассмотрено повышение изгибной выносливости деталей от вариации твердости при ППД.

Для получения качественного упрочнения ППД деталей машины необходимо учитывать способность металла к упрочнению, которая может быть оценена безразмерным показателем  $n$  из известной формулы Мейера, которая связывает усилие деформирования  $F$  с диаметром отпечатка  $d$  при статическом издавливании шарика:

$$F = na^2, \quad (1)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от свойств металла и диаметра шарика  $D_{ш}$ . В тех случаях, когда упрочняющая обработка ППД является финишной операцией, а поверхность детали должна иметь максимальную твердость —  $n \approx 2$ . В этом случае формула (1) имеет вид:

$$F = a_m d^2, \quad (2)$$

$$a_m = \frac{a_1}{D_{ш}^{n-1}}, \quad (3)$$

где  $a_m$  — давление на шарик любого диаметра при пластическом отпечатке  $d=1$  мм на полностью наклепанном металле;  $a$  — коэффициент, не зависящий от  $D_{ш}$ .

Из формулы (3) следует, что при полном наклепе должно соблюдаться условие  $a_0 \approx a_m$ . Для проверки этого положения использовали метод сжатия цилиндрических образцов с соотношением диаметра к высоте  $D_0/H_0=0,5$  на пятидесятитонном прессе ГРМ-1. Результаты опытов для сталей 1Х18Н9Т и ШХ15 представлены на рис. 1, откуда видно, что характер изменения  $a_0$  зависит от структуры испытываемых металлов:

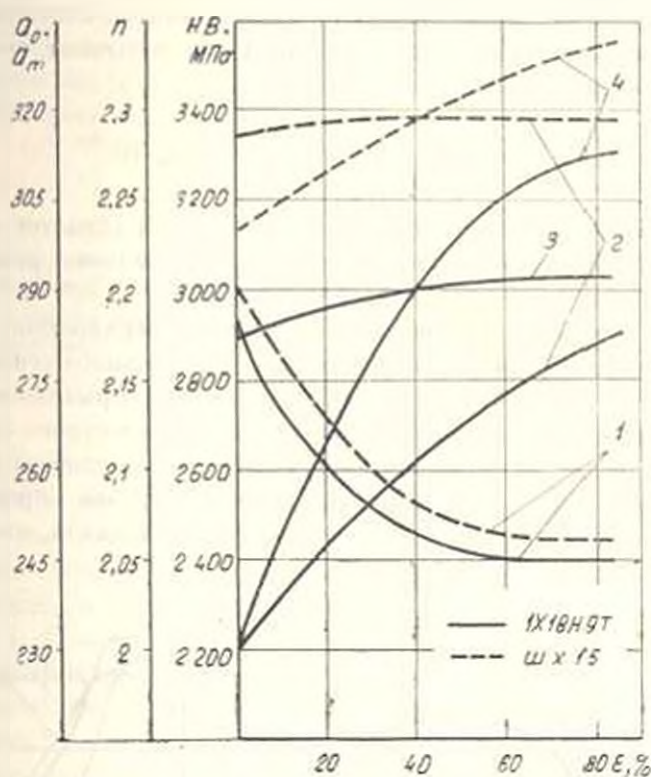


Рис. 1. Изменение показателей твердости в зависимости от относительной деформации сжатия  $\delta$ : 1 —  $n$ ; 2 —  $a_0$ ; 3 —  $a_m$ ; 4 —  $HB$ .

стали ферритно-перлитного класса, имеющие кубическую объемно-центрированную кристаллическую решетку, по сравнению со сталями аустенитного класса (гранецентрированная кристаллическая решетка) получили меньшее упрочнение. Для первых, в состоянии нормализации или термического улучшения величина  $a_0$  практически остается постоянной, поэтому можно принять, что при полном наклепе  $a_0 \approx a_m$ . Для вторых величину  $a_m$  можно определить из выражения

$$a_m = a_0 \cdot 10^{0,4(a_0 - 3)} \quad (4)$$

Максимальная твердость поверхностного слоя после упрочнения по Мейеру с достаточным для практического применения приближением можно принять равной твердости по Бринеллю или Виккерсу  $HM \approx HV \approx HB$  и следовательно

$$HM_{max} = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (5)$$

Согласно (2) и (5), окончательно получим:

$$HM_{\max} = \frac{4}{\pi} a_m. \quad (6)$$

Аналогично (6), для сталей ферритно-перлитного и аустенитного классов максимальную твердость поверхностного слоя, которая может быть достигнута при упрочнении ППД, рассчитывают, соответственно, по формулам:

$$HV_{\max} = \frac{4}{\pi} a_0; \quad HV_{\max} = \frac{4}{\pi} a_0 \cdot 10^{1,5(a-0,5)}. \quad (7)$$

На величину твердости поверхностного слоя и характер протекания упрочняющих процессов существенным образом влияют режимы обработки и геометрические параметры инструмента.

На рис. 2 показано изменение твердости поверхностного слоя образцов из стали 40 и 45 в зависимости от нормального усилия обкатывания шариком  $D_{ш} = 10$  и 15 мм. С увеличением нормального усилия и после достижения максимума твердости поверхностного слоя, который соответствует расчетным значениям  $HV_{\max}$ , начинается процесс его разупрочнения при дальнейшем увеличении нагрузки происходит отслаивание переупрочненных и охрупченных зон металла, что вызывает падение твердости поверхностного слоя.

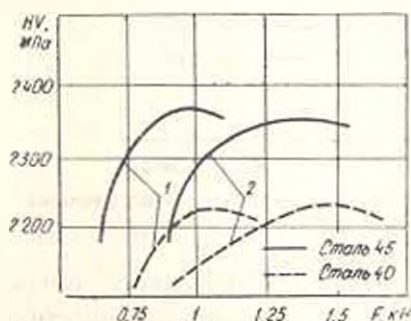


Рис. 2. Изменение поверхностной твердости в зависимости от нормального усилия обкатывания шариками: 1 —  $D_{ш} = 10$  мм; 2 —  $D_{ш} = 15$  мм.

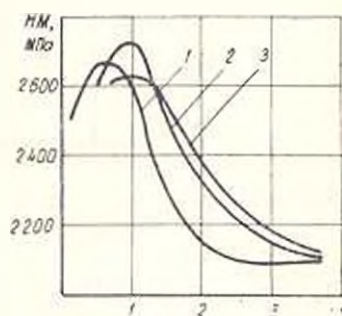


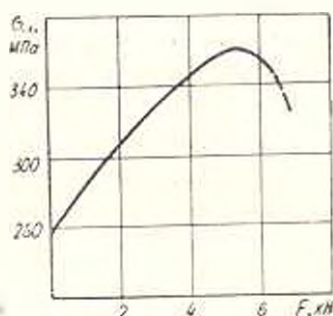
Рис. 3. Изменение твердости по глубине распространения пластической деформации в зависимости от усилия обкатывания роликом (контурный диаметр  $D_{рл} = 30$  мм, профильный радиус  $r = 1,25$  мм).

Из-за наличия градиента твердости в подповерхностных слоях по мере увеличения нормального усилия глубина распространения пластических деформаций возрастает и там же с некоторым сдвигом происходит повышение твердости до максимального значения и последующее ее снижение. На рис. 3 показано распределение твердости по глубине упрочненного слоя после обкатывания роликом образцов из стали 40X диаметром 18 мм: после достижения максимальной твердости при уси-

лин обкатывания  $F=5,2$  кН сопротивление деформированию возрастает за счет увеличения зоны максимального упрочнения и толщины поверхностно-упрочненного слоя. Анализ кривых на рис. 2, 3 показывает, что в трехмерном пространстве «глубина слоя — нормальное усилие — твердость» существует такое оптимальное сочетание параметров, при котором эффект упрочнения максимальный.

Таким образом, процесс упрочнения металлов ПВД состоит из двух периодов: а) достижения максимальной твердости на поверхности и б) упрочнения металла до максимальной твердости на определенной глубине упрочненного слоя.

Рис. 4. Изменение предела выносливости образцов из стали 40Х в зависимости от усилия обкатывания роликом (режимы упрочнения и инструмент аналогичны рис. 3).



В первый период упрочнения рост остаточных напряжений и твердости поверхностного слоя протекает синхронно. В дальнейшем, по мере увеличения усилия обкатывания твердость поверхностного слоя падает, а величина остаточных напряжений и ширина зоны их распространения растут. Изменение остаточных напряжений при этом носит возрастающе-убывающий характер [2] и имеет максимум на некоторой глубине пластического деформирования, которая зависит от усилия деформирования, параметров индентора, химического состава и механических свойств упрочненного материала. Твердость в этой области меняется аналогичным образом и наблюдается соответствие максимумов остаточных напряжений и сжатия и твердости, которое, в конечном итоге, может привести к повышению сопротивления усталости металла. Для подтверждения этого вывода проведены испытания тех же упрочненных образцов из стали 40Х на усталость при изгибе. Из рис. 4 видно, что изменение величины предела выносливости аналогично остальным показателям прочности: максимальное повышение составляет, примерно, 40% и это соответствует значению усилия деформирования, равному 5,2 кН.

Увеличение изгибной выносливости, обусловленное наличием остаточных напряжений сжатия и благоприятным комплексом свойств деформированного слоя, достигается за счет сопротивления поверхностных слоев материала зарождению усталостных трещин докритической длины и эффективного торможения трещины закритической длины в пределах зоны максимального упрочнения детали.

На основании проведенного исследования разработан технологический процесс упрочнения штоков штамповочных молотов диаметром



200 мм, изготовленных из стали 38ХНЗМФА, которые после термического улучшения приобретают при достаточной вязкости более высокую прочность, чем обычные конструкционные стали. Анализ долговечности этих штоков на Миномком заводе шестерен показал, что около 80% поломок имеют усталостный характер и являются следствием действия значительных перегрузок, превосходящих сопротивление штока разрушению. Применение ППД в сочетании с термической обработкой позволяет получить необходимую степень и глубину наклепа металла и остаточные сжимающие напряжения [3]. Процесс термообработки включает закалку и высокий отпуск, который обеспечивает получение сорбитной структуры стали и позволяет производить последующую чистовую токарную обработку.

Для обкатки штоков штамповочных молотов использовалось однороликовое приспособление с контурным диаметром ролика  $D_{рх} = 105$  мм и профильным радиусом  $r = 5$  мм.

Усиление обкалывания рассчитывали по формуле [4]:

$$F = k \cdot a_0 \cdot 0,8^x \cdot D_{пр}^{(2-0,5x)}, \quad (8)$$

где  $D_{пр} = 30$  мм — приведенный диаметр ролика;  $k = 0,7-0,8$  — коэффициент, учитывающий упрочку деформации металла. Для стали 38ХНЗМФА:  $n = 2,15$ ;  $a_0 = 218$ .

Проведены сравнительные эксплуатационные испытания партий упроченных и неупроченных штоков и согласно методике [5] определены их долговечности (в часах). Математическая обработка результатов испытаний произведена согласно [6].

Учитывая неизбежное рассеяние долговечности, сопутствующее усталостным испытаниям и зависящее от условий работы и других неконтролируемых факторов, целесообразно для сравнительных эксплуатационных испытаний выявить вид эмпирической функции распределения, определив ее основные статистические характеристики. Для этого составлены алгоритм и программа вычислительных операций и задача реализована на ЭВМ ЕС 1020. Понесовые вычисления и графические построения показали, что опытные данные лучше всего описываются логарифмически нормальным законом распределения (рис. 5). Оценка принадлежности резко выделяющихся результатов к данной совокупности (для упроченных штоков —  $x_{13} = x_{max} = \lg H_{max} = 2,9377$ ) произведена согласно критерию Романовского [6], для чего вычислены выборочное среднее значение  $\bar{x}$  и среднеквадратическое отклонение  $s$  (без учета члена  $x_{max}$ ) и проверено выполнение условия, при котором исключается или корректируется  $x_{max}$ :

$$\frac{x_{max} - \bar{x}}{s} > t_{\alpha}, \quad (9)$$

где  $t_{\alpha}$  зависит от уровня доверительной вероятности  $P$  и числа степеней свободы  $k = n - 1$  ( $n$  — число членов вариационного ряда). Для

нашего случая при  $P = 95\%$  и  $n = 14$  —  $t_0 = 2,2$ , а  $\frac{x_{\max} - \bar{x}}{s} = 3,36 > 2,2$ ; на рис. 5 показана корректировка члена  $x_{15}$ .

Как видно, опытные данные на логарифмически нормальной вероятностной бумаге удовлетворительно аппроксимируются прямой линией

$$x = \bar{x} + u \cdot s \quad (10)$$

( $u$  — квантиль нормального распределения), которая и является эмпирической функцией распределения  $\lg H$ . Для расчетного подтверж-

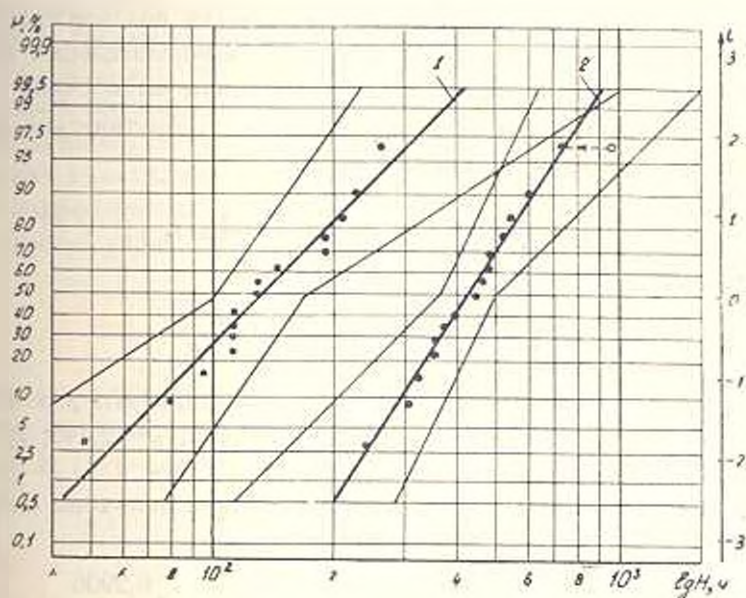


Рис. 5. Эмпирические функции распределения долговечностей и 95% ные доверительные границы: 1 — неупрочненные штоки; 2 — упрочненные штоки.

дения принадлежности вариационных рядов выбранному закону распределения (при  $n < 25$ ) определены выборочные числовые характеристики:

$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$  — среднее значение;  $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$  — средне-

квадратическое отклонение;  $A = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{ns^3}$ ,  $E = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{ns^4} - 3$  —

показатели асимметрии и эксцесса:  $s_A = \sqrt{\frac{6(n+1)}{(n+1)(n+3)}}$ ,

$s_E = \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)n}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}$  — среднеквадратические отклонения

$A$  и  $E$ , и проверено выполнение условий:

$$\left| \frac{A}{s_A} \right| < 3; \quad \left| \frac{E}{s_E} \right| < 3. \quad (11)$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

| Штоки         | $\bar{x}$ | $s$    | $A$     | $E$     | $s_A$  | $s_E$  | $\left  \frac{A}{s_A} \right $ | $\left  \frac{E}{s_E} \right $ |
|---------------|-----------|--------|---------|---------|--------|--------|--------------------------------|--------------------------------|
| Неупрочненные | 2,1186    | 0,1907 | -0,4217 | 0,3036  | 0,5401 | 0,8921 | 0,781                          | 0,408                          |
| Упрочненные   | 2,6275    | 0,1259 | -0,0763 | -0,7972 | 0,5401 | 0,8921 | 0,142                          | 0,894                          |

Абсолютные значения  $A$  и  $E$  существенно не отличаются от их среднеквадратических отклонений  $s_A$  и  $s_E$ , поэтому гипотеза нормального распределения логарифмов долговечностей подтверждается.

Для повышения точности и надежности вычислительных операций необходимо определить доверительные интервалы выборочных характеристик  $\bar{x}$  и  $s$ , внутри которых находятся их теоретические значения  $a$  и  $\sigma$  для генеральной совокупности:

$$\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha, k} < a < \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\alpha, k};$$

$$sz_1 \sqrt{\frac{n-1}{n}} < \sigma < sz_2 \sqrt{\frac{n-1}{n}},$$
(12)

где  $t_{\alpha, k}$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  — критерий Стьюдента и коэффициенты для заданного уровня  $P$  и  $k = n - 1$  (при  $P = 95\%$  и  $k = 14$ ;  $t_{\alpha, k} = 2,145$ ;  $z_1 = 0,732$ ;  $z_2 = 1,577$ ).

Для неупрочненных и упрочненных штоков получены следующие интервалы:

$$2,0129 < a_1 < 2,2243; \quad 0,1349 < \sigma_1 < 0,2906;$$

$$2,5578 < a_2 < 2,6972; \quad 0,089 < \sigma_2 < 0,1918.$$

Используя эти данные, на рис. 5 построены 95%-ные доверительные границы эмпирических функций распределения.

Для качественной оценки влияния эффекта упрочнения необходимо доказать, что сопоставимые вариационные ряды являются выборками из разных генеральных совокупностей, т. е. следует отвергнуть гипотезу равенства выборочных средних  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_2$  и их дисперсий  $s_1^2$  и  $s_2^2$ . Гипотезу равенства двух дисперсий производят с помощью дисперсионного отношения:

$$F = s_1^2/s_2^2 < F_{\alpha, k} (s_1^2 > s_2^2),$$
(13)

где  $F_{\alpha, k}$  — табличное значение критерия, зависящее от  $P$  и  $k_1 = n_1 - 1$ ,  $k_2 = n_2 - 1$ , (при  $P = 95\%$ ,  $k_1 = k_2 = 14$  —  $F_{\alpha, k} = 2,49$ ).

Для нашего случая  $F = 2,294 < 2,49$ , т. е. подтверждается гипотеза равенства генеральных дисперсий  $\sigma_1^2 \approx \sigma_2^2$ . Тогда  $s_1^2$  и  $s_2^2$  объединяются в сводную дисперсию:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}.$$

а гипотеза равенства выборочных средних проверяется расчетом критерия Стьюдента  $t$  и выполнении условия:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \leq t_{\alpha, k} \quad (14)$$

где  $t_{\alpha, k}$  выбирается согласно  $P$  и  $k = n_1 + n_2 - 2$  (при  $P = 95\%$ ;  $k = 28$ ;  $t_{\alpha, k} = 2,048$ ). Для наших расчетов  $s = 0,1616$ , а  $t_{\alpha, k} = 8,63 > 2,048$ , т. е. гипотеза равенства  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  отвергается. Это означает, что имеем две нормальные распределенные генеральные совокупности с одинаковой дисперсией, но разными мат. ожиданиями, т. е. эффект упрочнения оказывает неслучайное и значимое влияние на циклическую долговечность штоков штамповочных молотов.

Проведенные статистические вычисления позволяют получать зависимости для количественной оценки эффекта упрочнения. Если ввести понятие коэффициента долговечности в виде отношения циклических долговечностей упрочненных и неупрочненных штоков:

$$k_n = \frac{H_{yn}}{H} \quad (15)$$

то, используя уравнение эмпирических функций распределения долговечностей, получим зависимость для определения средневероятностных значений  $\bar{k}_n$  от вероятности разрушения  $P(x)$ :

$$\lg \bar{k}_n = \lg H_{yn} - \lg H - (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) + u(s_1 - s_2)$$

или

$$\lg \bar{k}_n = \bar{\Delta x} + u \Delta s. \quad (16)$$

В нашем случае:  $\lg \bar{k}_n = 0,5088 - 0,0648 u$ .

При низкой вероятности разрушения ( $P(x) = 0,5\%$ ,  $u = -2,575$ ), представляющей интерес в расчетной практике проектирования оборудования —  $\bar{k}_n = 4,74$ , а  $95\%$ -ные доверительные границы —  $3,66 < \bar{k}_n < 6,53$ .

Использование соотношения (16) позволяет на этапе создания высокоэффективных технологических процессов, минуя дорогостоящие и трудоемкие натурные испытания, по результатам лишь исходной серии испытаний с заранее заданной вероятностью безотказной работы рассчитывать срок службы ответственных и тяжело нагруженных деталей машин подобного класса и прогнозировать ожидаемый экономический эффект от применения упрочняющей технологии.



# ՄԵԲԵՆԱՆԵՐԻ ՄԱՍԵՐԻ ԵՌՄԱՆ ԴԻՄԱՑԿՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՈԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԱՅԻՆ ՊԼԱՍՏԻԿ ԳԵՖՈՐՄԱՑՄԱՍԸ

## Ա մ փ ո փ ու մ

Ուսումնասիրված են ամրացնող պրոցեսները, որոնք ընթանում են մեքենաների մասերի մակերևույթային շերտերում, այդ շերտերը, հարթեցնող հորվակով կամ ղեղիկով պլաստիկ ղեֆորմացիայից հետո 40X և 38X113MΦA մակնիշի պողպատների համար որոշված են ամրացնող տեխնոլոգիայի սեփմները, որոնց կիրառման դեպքում մակերևույթային շերտերի կարծրությունը առավելագույնն է և որոնք 40 % -ով մեծացնում են ծոման պիմացկունության սահմանը:

Կատարված են դրոշմիչների մխոցակոթերի համեմատական շահագործման փորձարկումներ, բացահայտված է երկարակեցության բաշխման օրենքը և ստացված է բանաձև, որով կարելի է հաշվարկել մակերևույթային պլաստիկ ղեֆորմացման ենթարկված մխոցակոթերի երկարակեցության տեղ համեմատականությունների առնության հիման վրա:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кудрявцев Н. Н. Торможение развития усталостных трещин в сталях поверхностным наклепом. Металловедение и термическая обработка металлов, 1974, № 1, с. 40—45.
2. Шкальников А. М., Шахов В. П. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. М. Машиностроение, 1964—184 с.
3. Кудрявцев Н. Н. Неразпространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982—171 с.
4. Александров Б. Н., Янков Н. Н., Янков Н. Н. Повышение усталостной прочности деталей машин ИИД. Изв. АН БССР (сер. ТИ), 1977, № 3, с. 9—11.
5. Хазанов Н. Н., Мазалов В. В. Регенерация выносливости деталей машин с выработанным ресурсом методами поверхностного упрочнения. В кн.: Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием. М., Машиностроение, 1970, с. 142—146.
6. Степков М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972—231 с.