

До оцінки пошкоджуваності матеріалу за параметром його пружних властивостей

М. Р. Музика

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Описано методики визначення модуля нормальної пружності пластично деформованого матеріалу за значеннями твердості й оцінки пошкоджуваності матеріалу за дефектом модуля післядії. Модуль нормальної пружності – один із показникових параметрів, чутливих до зміни структурного стану. Для деформованого і недеформованого стану матеріалу він відрізняється накопиченням у матеріалі розсіяних пошкоджень різної природи. Установлено, що при оцінці ступеня пошкоджуваності матеріалу в процесі напрацювання більш інформативним порівняно з дефектом модуля пружності є дефект модуля післядії, тобто після напрацювання, який приймається як міра дефектності матеріалу і визначається як відношення дефекту модуля пружності до його поточного значення. Наведено результати дослідження співвідношень між модулем пружності і параметром пошкоджуваності матеріалу. Установлено стійку кореляційну залежність між модулем пружності і параметром гомогенності Вейбулла, який описує ступінь розсіяння характеристик твердості, корелює зі зміною фізико-механічних властивостей матеріалу й обчислюється за ступенем розсіяння значень твердості за формулою Гумбеля. Визначені під навантаженням значення твердості металу на стадіях напрацювання більш достовірно характеризують фактичний рівень накопичених пошкоджень у металі порівняно з такими у розвантаженому стані, а розсіяння значень твердості буде більшим. Наведено залежності, за якими при відомому робочому напруженні на даному етапі напрацювання визначається відповідне поточне значення модуля пружності матеріалу елемента конструкції, а за дефектом модуля післядії – пошкоджуваність матеріалу. Показано, що для всіх досліджених матеріалів пластична деформація призводить до зменшення модулів пружності матеріалу. Зниження значень модулів пружності по мірі збільшення деформації відбувається також після попередньої пластичної деформації матеріалу, яку при проведенні випробувань було реалізовано шляхом розвантаження після досягнення різних ступенів пластичної деформації.

Ключові слова: модуль нормальної пружності, дефект модуля післядії, твердість, параметр розсіяння характеристик твердості, пошкоджуваність, параметр гомогенності Вейбулла.

Вступ. Кінетику накопичення пошкоджень у матеріалі в процесі експлуатації конструкції визначають різними методами, у тому числі за фізичними параметрами, що характеризують зміну електроопору, твердості, модуля нормальної пружності, та іншими властивостями матеріалу.

Залежність величини модуля нормальної пружності від ступеня пластичної деформації не має однозначного пояснення. Згідно з відомими даними ця залежність пов'язується із характером протікання пластичної деформації в матеріалі, зокрема з впливом залишкових мікронапружень, що виникають при наклепі [1, 2], зі зростанням кількості дислокацій і зміною їх рухливості за будь-якого пластичного деформування, кількістю (щільністю) і напрямком смуг ковзання [3] або зі спотвореннями кристалічної ґратки [4]. Аналіз цих даних показав, що найбільш поширеним є фізично обґрунтований механізм зміни модуля пружності внаслідок розвитку спрямованої текстури, наявності лінійних дефектів (дислокацій), зміни геометрії кристалічної ґратки, що впливає на зміни міжатомної відстані в кристалічній ґратці, і сил міжатомної взаємодії [5]. При деформуванні полікристалічного матеріалу відстань між сусідніми атомами збільшується, в результаті чого сили взаємодії між атомами в

напрямку деформування зменшуються. Разом із цим відбуваються структурні зміни: утворення переважно орієнтованої текстури – витягування і дроблення випадково орієнтованих зерен, їх поворот по площинах ковзання й орієнтування в напрямку навантаження. У полікристалічному матеріалі, що складається з великої кількості випадково орієнтованих зерен, модулі пружності є усередненими модулями окремих зерен.

Таким чином, модуль нормальної пружності є одним із показникових параметрів, чутливих до зміни структурного стану. Для матеріалу в деформованому і недеформованому стані він відрізняється внаслідок накопичення розсіяних пошкоджень різної природи [6]. Чутливість модуля пружності до змін структури матеріалу [7] зумовлює проведення подальших досліджень, спрямованих на розширення області застосування модуля пружності як чутливої до змін структури характеристики для оцінки рівня пошкоджуваності матеріалу під час експлуатації конструкції.

Методика оцінки пошкоджуваності матеріалу. Залежність модуля пружності від рівня деформованого стану матеріалу має велике значення для прогнозування зміни властивостей при напруженнях його пластичної деформації.

Пошкодженість D матеріалу ($0 \leq D \leq 1$, $D = 0$ відповідає непошкодженому стану) можна визначити через модуль нормальної пружності [8]: $\sigma = E_0(1 - D)\epsilon_e$, де σ – напруження; E_0 – модуль пружності першого роду матеріалу у вихідному стані; ϵ_e – пружна деформація.

Ступінь пошкоджуваності матеріалу в процесі напрацювання оцінюється з використанням дефекту модуля пружності ΔE , що виникає внаслідок впливу зовнішніх температурно-силових дій [9, 10]: $\Delta E = E_0 - E_{п.н}$, де $E_{п.н}$ – модуль пружності після напрацювання.

Доцільно ступінь деградації матеріалу оцінювати за відношенням дефекту модуля до його початкового значення, що приймається за міру дефектності матеріалу:

$$D_1 = \Delta E/E_0 = [(E_0 - E_{п.н})/E_0] \cdot 100\%, \quad (1)$$

яка є більш показниковою, оскільки відношення $\Delta E/E_0$ характеризує інтенсивність зростання дефекту модуля пружності і корелює з пошкодженістю матеріалу.

Така оцінка пошкоджуваності матеріалу внаслідок його деградації з використанням постійного коефіцієнта, що включає вихідне значення модуля пружності $k = 1/E_0$, не в повній мірі описує зміну останнього. Більш інформативною є оцінка за дефектом модуля післядії D_2 , тобто після напрацювання, що приймається як міра дефектності матеріалу і визначається як відношення дефекту модуля пружності до його поточного значення $E_{пт}$:

$$D_2 = \Delta E/E_{пт} = [(E_0 - E_{пт})/E_{пт}] \cdot 100\%. \quad (2)$$

Для діагностування технічного стану конструкцій за зміною фізико-механічних властивостей матеріалу широко використовується високопродуктивний, доступний і простий метод визначення звичайної твердості [11]. Оскільки за цим методом визначається результуючий опір впровадженню індентора в метал, твердість є узагальненою характеристикою пружно-пластичних властивостей матеріалу.

Однак цей метод, незважаючи на його очевидні переваги, є недостатньо чутливим до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу [12]. Більш перспективним є використання структурно-чутливого коефіцієнта гомогенності m Вейбулла [13], який відображає ступінь розсіяння характеристик твердості, корелює зі зміною фізико-механічних властивостей матеріалу і обчислюється за ступенем розсіяння визначених значень твердості за формулою Гумбеля [14].

Для визначення поточного значення модуля пружності першого роду матеріалу $E_{\text{пт}}$ проводять навантаження зразків при одновісному розтязі до заданого рівня деформації, фіксують при цьому напруження у зразку і величину пружної деформації. Визначають значення твердості матеріалу і параметр m їх розсіяння, а поточний модуль пружності обчислюють наступним чином:

$$E_{\text{пт}} = E_0 + \alpha t, \quad (3)$$

де α – параметр механічних властивостей матеріалу, що визначається як відношення напруження у матеріалі при заданому рівні деформації до величини відповідної пружної деформації при розвантаженні [15]. Зазначимо, що у цьому випадку зразки виготовляють шляхом їх вирізання з конструкції, що не завжди можливо. Більш прийнятним є метод, що базується на визначенні твердості.

Результати досліджень*. Експериментальне дослідження ступеня деградації матеріалу в процесі напрацювання проводили за дефектами модулів пружності D_1 і D_2 на зразках із сірого чавуну СЧ15 і листових конструкційних матеріалів різних класів. Зразки деформували за одновісного розтягу до деформації $\varepsilon = 0,11; 0,22; 0,54$ і $0,77\%$ – деформації напрацювання, що відповідає ресурсному терміну. При цьому відповідно отримано поточні значення модуля пружності при наведених деформаціях: $E_{\text{пт}} = 9,2 \cdot 10^4; 8,2 \cdot 10^4; 5,9 \cdot 10^4; 5,0 \cdot 10^4$ МПа. Модуль пружності E_0 у вихідному стані складає $10,6 \cdot 10^4$ МПа. Поточні, розраховані за формулами (1) і (2) значення дефектів модуля пружності матеріалу, становили $D_1 = 0,13; 0,22; 0,44$ і $D_2 = 0,15; 0,29; 0,78$, а при досягненні розрахункового терміну напрацювання – $D_1 = 0,62, D_2 = 1,1$.

На рис. 1 показано зміни модуля пружності і дефектів модуля пружності чавуну СЧ15 у залежності від деформації.

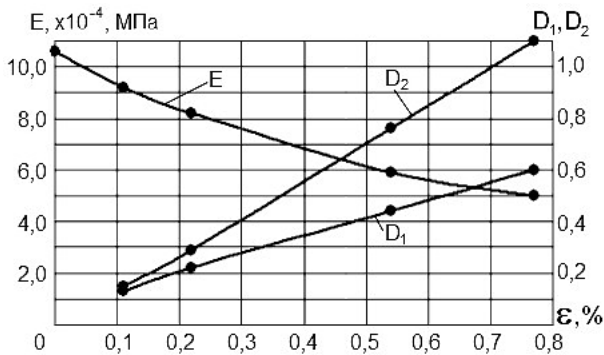


Рис. 1. Залежність модуля пружності і дефектів модуля пружності чавуну СЧ15 від деформації.

Видно, що криві дефектів модуля пружності D_1 і D_2 близькі до лінійних залежностей. Дефект модуля післядії D_2 порівняно з D_1 є більш показниковим параметром, чутливим до пошкодженості матеріалу, оскільки описує його поточний стан і враховує не тільки початкове значення модуля, а й показує, наскільки він змінився після напрацювання на момент обчислення, тобто дозволяє оцінити пошкодженість матеріалу. Порівняння поточних значень рівнів деградації матеріалу з рівнем деградації, що відповідає розрахунковому терміну напрацювання, дозволяє визначити кінетику деградації протягом всього періоду експлуатації.

* Експерименти виконувалися під керівництвом акад. НАН України Лебедева А. О.

Зразки для випробувань виготовляли з листової сталі марок 20К, 45, 12Х18Н10Т і алюмінієвого сплаву Д16Т, шорсткість робочої частини поверхні складала приблизно 1 мкм. Зразки навантажували до фіксованих значень деформації $\varepsilon = 0,04; 0,07; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0\%$. Твердоміром фірми ERNST, що має автоматичну систему обробки даних [16], проводили масові вимірювання значень твердості матеріалу за шкалою HRB.

У табл. 1–4 наведено результати експериментальних досліджень твердості і параметра m розсіяння характеристик твердості за даними 30 вимірювань при розтязі зразків матеріалу в навантаженому і розвантаженому стані, де $\varepsilon_{\text{пр}}$ і $\varepsilon_{\text{зал}}$ – пружна і залишкова складові деформації, $m_{\text{н}}$ і $m_{\text{р}}$ – параметр розсіяння характеристик твердості матеріалу в навантаженому і розвантаженому стані, $\overline{HRB}_{\text{н}}$, $\overline{HRB}_{\text{р}}$ – середнє значення твердості матеріалу в навантаженому і розвантаженому стані.

Т а б л и ц я 1

Механічні характеристики і параметри гомогенності структури сплаву Д16Т

$\varepsilon, \%$	$\varepsilon_{\text{пр}}, \%$	$\varepsilon_{\text{зал}}, \%$	$m_{\text{н}}$	$m_{\text{р}}$	$\sigma_i, \text{МПа}$	$\bar{E}, \text{ГПа}$	$\overline{HRB}_{\text{н}}$	$\overline{HRB}_{\text{р}}$
0	–	–	–	127,2	–	–	–	79,2
0,04	0,0397	0,0003	104,2	110,4	35,3	88,7	79,0	79,2
0,07	0,0606	0,0094	100,5	105,5	53,6	88,5	79,0	79,3
0,1	0,0898	0,0102	90,1	102,8	79,2	88,2	79,1	79,4
0,2	0,1797	0,0203	86,6	100,1	158,4	88,1	78,9	79,7
0,5	0,3466	0,1534	82,9	89,5	304,7	87,9	79,5	80,0
1,0	0,4066	0,5934	77,9	82,8	355,8	87,5	79,7	80,3

Т а б л и ц я 2

Механічні характеристики і параметри гомогенності структури сталі 12Х18Н10Т

$\varepsilon, \%$	$\varepsilon_{\text{пр}}, \%$	$\varepsilon_{\text{зал}}, \%$	$m_{\text{н}}$	$m_{\text{р}}$	$\sigma_i, \text{МПа}$	$\bar{E}, \text{ГПа}$	$\overline{HRB}_{\text{н}}$	$\overline{HRB}_{\text{р}}$
0	–	–	–	138,8	–	–	–	86,9
0,04	0,0334	0,0066	117,7	124,4	66,3	198,5	87,0	87,4
0,07	0,0631	0,0069	106,9	118,9	125,1	198,3	86,6	88,0
0,1	0,0900	0,0100	101,1	110,0	178,2	198,0	87,3	88,0
0,2	0,1510	0,0490	99,3	104,5	298,6	197,7	85,9	88,8
0,5	0,1980	0,3020	94,4	100,5	391,1	197,4	87,9	89,2
1,0	0,2280	0,7720	85,7	90,4	449,5	197,2	89,2	90,0

Відмітимо, що початкове значення параметра $m_{\text{р}}$ (при $\varepsilon = 0$) залежить від технології виготовлення матеріалу і зразків.

Із даних табл. 1–4 видно, що пластична деформація досліджуваних матеріалів призводить до незначного збільшення їх твердості у діапазоні деформацій до 1%, в той час як параметр розсіяння характеристик твердості суттєво змінюється.

Т а б л и ц я 3

Механічні характеристики і параметри гомогенності структури сталі 20К

ε , %	$\varepsilon_{пр}$, %	$\varepsilon_{зал}$, %	m_n	m_p	σ_i , МПа	\bar{E} , ГПа	\overline{HRB}_n	\overline{HRB}_p
0	–	–	–	135,2	–	–	–	75,5
0,04	0,0391	0,0009	93,7	119,6	88,5	226,3	74,5	75,6
0,07	0,0689	0,0110	91,0	103,5	154,4	224,1	74,7	75,7
0,1	0,0769	0,0231	87,6	97,5	169,6	220,4	74,9	75,9
0,2	0,0985	0,1015	83,9	94,7	216,1	219,2	74,0	75,8
0,5	0,1366	0,3634	78,6	93,0	293,6	214,9	74,6	75,9
1,0	0,1545	0,8455	73,9	90,6	326,6	211,3	74,7	76,0

Т а б л и ц я 4

Механічні характеристики і параметри гомогенності структури сталі 45

ε , %	$\varepsilon_{пр}$, %	$\varepsilon_{зал}$, %	m_n	m_p	σ_i , МПа	\bar{E} , ГПа	\overline{HRB}_n	\overline{HRB}_p
0	–	–	–	162,5	–	–	–	88,2
0,04	0,0365	0,0035	135,8	150,6	73,5	209,4	88,3	88,4
0,07	0,0639	0,0061	127,2	136,9	127,6	208,8	88,0	88,5
0,1	0,0910	0,0090	116,6	131,6	187,3	207,9	88,0	88,6
0,2	0,1425	0,0575	92,9	124,3	295,5	207,4	88,3	88,9
0,5	0,1695	0,3305	89,6	106,5	349,6	206,2	89,3	89,5
1,0	0,1829	0,8171	85,6	96,0	373,2	204,1	89,7	90,2

На рис. 2 наведено залежності параметра розсіяння характеристик твердості матеріалу у розвантаженому і навантаженому стані від деформації.

Видно, що з ростом деформації параметр m зменшується, причому більш суттєво у навантаженому стані. Значення m , обчислені для пружної ділянки розтягування до 0,1% і для пластичної ділянки в інтервалі 0,1...1,0%, добре розподіляються на прямій.

Внаслідок накопичення розсіяних пошкоджень у матеріалі модуль пружності змінюється. Рис. 3 ілюструє залежність модуля пружності від рівня деформації матеріалу в розвантаженому і навантаженому стані. Видно, що для всіх досліджених матеріалів пластична деформація зумовлює зменшення модуля пружності. Зниження значень модуля пружності зі збільшенням деформації відбувається і після попередньої пластичної деформації матеріалу, яку при проведенні випробувань було реалізовано шляхом розвантаження після досягнення різного ступеня пластичної деформації.

При малих пружно-пластичних деформаціях величина внутрішніх напружень недостатня для розкриття початкових дефектів. Пошкоджувальність структури в оцінці параметрами розсіювання характеристик твердості матеріалу в розвантаженому стані, що фіксується, буде суттєвішою, ніж у навантаженому. При напруженнях у зразку, що перевищують границю пропорційності матеріалу, дія сил проявляється сильніше, якщо метал знаходиться у навантаженому (робочому) стані. Приховані дефекти розкриваються. Значення твердості матеріалу у навантаженому стані на стадіях напруцювання більш достовірно описують фактичний рівень накопичених пошкоджень [17], а їх розсіяння буде більшим, ніж у розвантаженому стані.

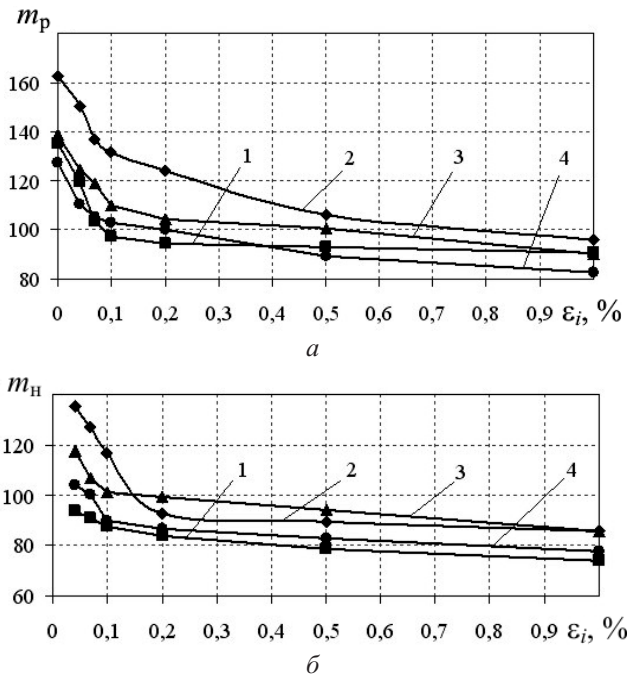


Рис. 2. Залежність параметра розсіяння характеристик твердості матеріалу в розвантаженому (а) і навантаженому (б) стані від рівня загальної деформації: 1 – сталь 20К; 2 – сталь 45; 3 – сталь 12Х18Н10Т; 4 – сплав Д16Т.

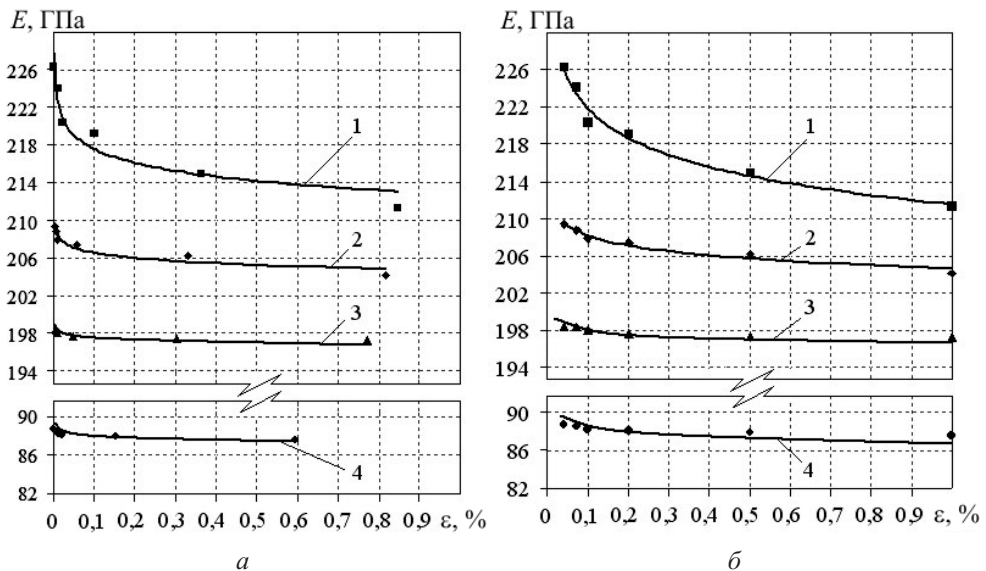


Рис. 3. Трансформація модуля пружності зі збільшенням ступеня пластичної деформації матеріалу в розвантаженому (а) і навантаженому (б) стані.

Характер представлених на рис. 2, 3 залежностей $m-\epsilon_i$ і $E-\epsilon$ подібний, що свідчить про існування відповідної кореляції між параметрами E і m . На рис. 4 наведено експериментальні залежності модуля пружності E від параметра m для матеріалів у розвантаженому і навантаженому стані.

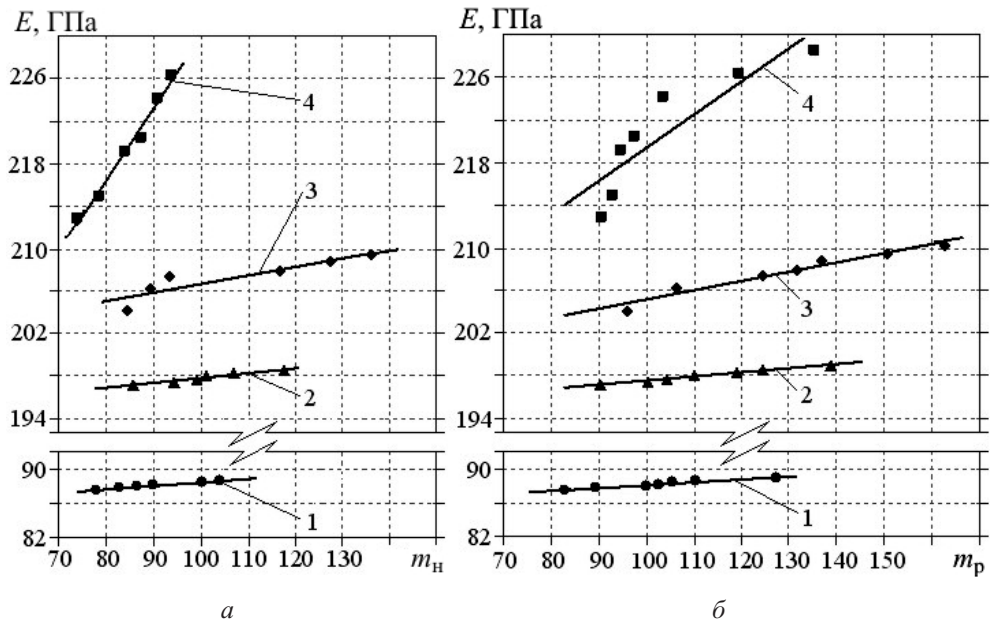


Рис. 4. Залежність параметра розсіяння твердості матеріалу в навантаженому (а) і розвантаженому (б) стані від модуля пружності: 1 – сплав Д16Т; 2 – сталь 12Х18Н10Т; 3 – сталь 45; 4 – сталь 20К.

Видно, що при деформаціях матеріалу, рівень яких перевищує границю пропорційності, модуль пружності першого роду і параметр m знаходяться у кореляційній залежності, яка наближається до прямо пропорційної.

Шляхом екстраполяції приведених на рис. 4 залежностей до рівня визначеного на даному етапі напрацювання при відомому робочому напруженні обчислюється відповідне поточне значення модуля пружності $E_{\text{пр}}$ матеріалу елемента конструкції, а за дефектом модуля післядії D_2 – пошкоджуваність матеріалу.

Висновки

1. Установлено, що модуль пружності і відповідні параметри розсіяння визначених значень твердості при заданій деформації знаходяться в кореляційній залежності, яка наближається до прямо пропорційної.

2. У процесі напрацювання внаслідок накопичення пошкоджень дефект модуля пружності зростає, а його поточне значення зменшується. Показано можливість проведення діагностики стану матеріалу елемента конструкції, що знаходиться в експлуатації, за відповідними кореляційними залежностями шляхом визначення поточного значення модуля пружності матеріалу.

Резюме

Приведены методики определения модуля нормальной упругости пластически деформированного материала по значениям твердости и оценки повреждаемости материала по дефекту модуля последствия. Модуль нормальной упругости является одним из показательных параметров, чувствительных к изменению структурного состояния, как для деформированного, так и недеформированного состояний материала. Вследствие накопления в материале рассеянных повреждений различной

природи он разный. Установлено, что при оценке степени поврежденности материала в процессе наработки более информативным по сравнению с дефектом модуля упругости является дефект модуля последействия, т.е. после наработки, который принимается в качестве меры дефектности материала и определяется как отношение дефекта модуля упругости к его текущему значению. Представлены результаты исследования соотношений между модулем упругости и параметром повреждаемости материала. Установлена устойчивая корреляционная зависимость между модулем упругости и параметром гомогенности Вейбулла, который отражает степень рассеяния характеристик твердости, коррелирует с изменением физико-механических свойств материала и рассчитывается по степени рассеяния значений твердости по формуле Гумбеля. Вычисленные под нагрузкой значения твердости металла на стадиях наработки более достоверно характеризуют фактический уровень накопленных повреждений в металле по сравнению с таковыми металла в разгруженном состоянии, а рассеяние значений твердости будет большим. Приведены зависимости, по которым при известном рабочем напряжении на данном этапе наработки определяется соответствующее текущее значение модуля упругости материала элемента конструкции, а по дефекту модуля последействия – повреждаемость материала. Показано, что для всех исследованных материалов пластическая деформация приводит к уменьшению модулей упругости материала. Снижение значений модулей упругости по мере увеличения деформации происходит и после предварительной пластической деформации материала, которая при проведении испытаний была реализована путем разгрузки по достижении различной степени пластической деформации.

1. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
2. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. Пер. с англ. под ред. Э. М. Надгорного, Я. М. Сойфера. М.: Атомиздат, 1975. 472 с.
3. Горб М. Л., Карпинос Д. М., Островский А. А. Экспериментальное исследование влияния деформационной анизотропии на упруго-пластические свойства тонколистовой стали. *Пробл. прочности*. 1970. № 7. С. 25–30.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2 ч. Ч 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
5. Унксов Е. П., Джонсон У., Колмогоров В. Л. и др. Теория пластических деформаций металлов. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
6. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
7. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А. Влияние размера зерна на рост поврежденности металла при пластическом деформировании. *Пробл. прочности*. 1997. № 5. С. 5–13.
8. Леметр Л. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. *Теорет. основы инж. расчетов*. 1985. **107**, № 1. С. 90–98.
9. Лебедев А. А., Ламашевский В. П., Маковецкий И. В., Волчек Н. Л. Развитие повреждений в сером чугуна при статическом деформировании. *Пробл. прочности*. 2003. № 6. С. 39–46.
10. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. 133 с.

11. РД ЭО 0027-94. Инструкция по определению характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. Т. 1, 2. М.: Концерн Росэнергоатом, 1994. 68 с.
12. Лебедев А. О., Музика М. Р. Технічна діагностика стану матеріалу методом ЛМ-твердості. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. С. 97–101.
13. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 1951. **18**, No. 3. P. 293–297.
14. Gumbel E. J. *Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications*. Washington: National Bureau of Standards, 1954. 472 p.
15. Пат. України № 69710. Спосіб визначення модуля пружності першого роду матеріалу. А. О. Лебедев, М. Р. Музика, В. П. Швець. Опубл. 10.05.2012. Бюл. № 9.
16. COMPUTEST SC. Ernst Härteprüfer SA. Lamone, Switzerland.
17. Музыка Н. Р., Маковецкий И. В., Швець В. П. Оценка влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке. *Пробл. прочности*. 2008. № 4. С. 102–107.

Поступила 09. 10. 2017