

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДІВ

Д.Ю.Петрина

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 42342,
e-mail: public@nuing.edu.ua

Експлуатаційні перевантаження часто призводять до утворення залишкової пластичної деформації сталей трубопроводів. Встановлено вплив пластичної деформації на величини модуля пружності E і коефіцієнта поперечної деформації трубних сталей 17Г1С і 20 у складних умовах навантаження. Отримано зв'язок між зміною E і μ . Дається якісне пояснення впливу наклепу з точки зору дислокаційної картини будови металів.

Эксплуатационные перегрузки часто приводят к образованию остаточной пластической деформации сталей трубопроводов. Установлено влияние пластической деформации на величины модуля упругости E и коэффициента поперечной деформации трубных сталей 17Г1С и 20 в сложных условиях нагружения. Получена связь между изменением E и μ и дано качественное объяснение влияния наклепа с точки зрения дислокационной картины строения металлов.

The operating overloads often result in formation of remaining plastic deformation of pipelines steel.

Influence of plastic deformation is set on the quantity of the modulus of elasticity E and coefficient of transversal deformation of pipelines steel 17Г1С and 20 in the difficult conditions of loading. Condition is got between the E change and μ and qualified explanation of influencing of workhardening is given from point of distribution picture of structure of metals.

Технологічні процеси під час виготовлення труб, перевантаження їх у ході транспортування та під час укладальних робіт зсув ґрунтів і екстремальне прикладання навантаження часто призводять до утворення залишкової пластичної деформації сталей трубопроводів. Як наслідок, наклепаний матеріал змінює свої механічні властивості, що ускладнює можливість точного прогнозування умов подальшої роботи трубопроводу, який повинен задовольняти стандартним механічним характеристикам. Питанню впливу наклепу на механічні властивості сталей на сьогодні приділяється значна увага, проте дослідження сталей трубопроводів перебувають на початковій стадії.

Вперше вплив наклепу на модуль пружності сталі 17Г1С-У розглядався у роботі [1]. У роботі [2] встановлено вплив низькочастотної втоми на кінетику деформування сталі трубопроводу. Більш детально закономірності зміни механічних характеристик наклепаних розтягом трубних сталей 17Г1С і 20 досліджуються у роботі [3].

Для отримання повнішої картини поведінки трубних сталей 17Г1С і 20 після перевантажень нами проведено дослідження впливу почергового прикладання навантажень різної інтенсивності, пластичного деформування стисканням, а також знакозмінними навантаженнями на механічні характеристики цих матеріалів.

Спочатку метою випробування партії зразків сталі 17Г1С було визначення ступеня впливу наклепу розтягом на модуль пружності у процесі стискання та визначення впливу на модуль пружності під час розтягування невеликого проміжного навантаження стиском.

Зразку надався невеликий наклеп розтягом. Після цього здійснювали розвантаження

та стискання зразка до напружень $\sigma_c = -100$ МПа з метою визначення модуля пружності наклепаного матеріалу під час стискання (E_c). Після цього зразок розвантажували і надавали йому пластичної деформації розтягу більшої величини. Одночасно визначали модуль пружності матеріалу після пластичної деформації розтягом з подальшим пружним стиском. Навантаження прикладалися доти, поки сумарна залишкова деформація не сягала величини $e_{np} = 20\%$.

На рис. 1 зображено криві січних модулів розтягу E_p і стиску E_c залежно від ступеня наклепу розтягом e_{np} за різних рівнів напружень (параметр ε_p для E_p і параметр ε_c для E_c). Характер кривих вказує, що пластична деформація розтягу викликає дуже сильний спад модуля пружності під час стискання. Залишкова деформація $e_{np} = 3...5\%$ знижує січний модуль стиску E_c приблизно вдвічі порівняно з відповідною величиною до наклепу, а подальше збільшення наклепу сприяє невеликому його зростанню.

Вплив e_{np} на величину модуля під час розтягу E_p залишається якісно таким, як і описаний у роботі [3], проте наявність проміжного стиску суттєво підсилює ефект наклепу розтягом. З порівняння значень E_p на рис. 2 в роботі [3] і рис. 1 випливає, що падіння E_p в другому випадку стрімкіше. При $\varepsilon_p = 0$ воно складає понад 10% від початкової величини. Вплив стискання проявляється також у тому, що мінімальні значення E_p зсуваються в бік менших величин e_{np} .

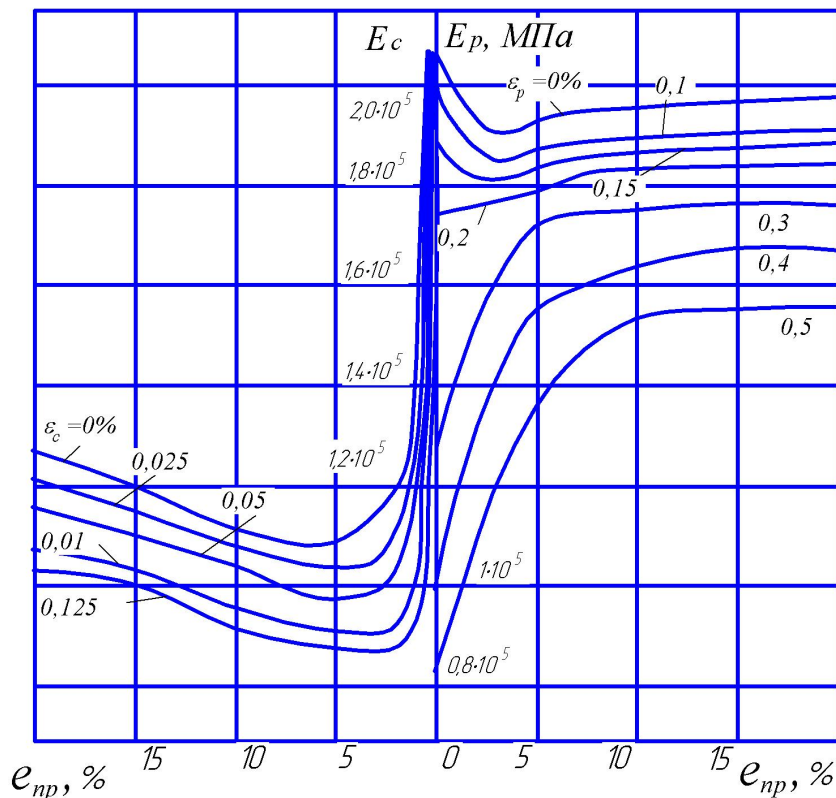


Рисунок 1 — Залежності січних модулів розтягу E_p і стиску E_c сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації розтягом e_{np} за різних значень відносного видовження ϵ_p і відносного стиску ϵ_c ($\sigma_c = -100 \text{ МПа}$)

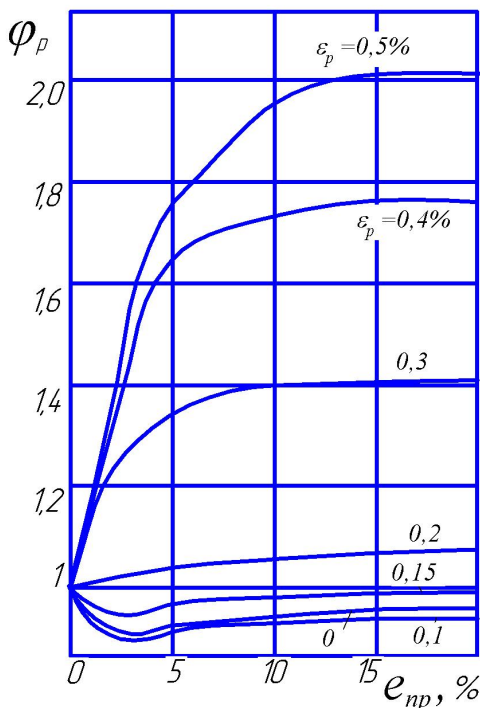


Рисунок 2 — Вплив проміжного стиску ($\sigma_c = -100 \text{ МПа}$) на залежність відносної зміни модуля E_p сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації e_{np} за різних значень відносного видовження ϵ_p

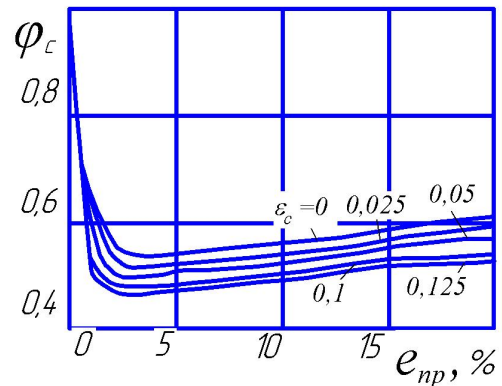


Рисунок 3 — Залежність відносної зміни модуля стиску сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації e_{np} за різних значень відносного стиску ($\sigma_c = -100 \text{ МПа}$)

Графік коефіцієнта φ_p , обчисленого за формулою (3) [3], зображено на рис. 2. Криві φ_p , в основному, аналогічні кривим рис. 3 [3]. Слід зауважити, що три нижні криві (рис. 2) мають чітко виражений мінімум за $e_{np} = 3 \dots 4\%$, чого не спостерігалось на рис. 3 [3]. Крім цього, вплив проміжного стискання проявляється в більш швидкому падінні кривих φ_p за малих значень ϵ_p .

Відносне зменшення січного модуля стиску після наклепу розтягом визначаємо шляхом введення коефіцієнта

$$\varphi_c = \frac{E_c}{E e_{np=0}} \quad (1)$$

Криві φ_c для невеликих величин стискуючого навантаження зображено на рис. 3. Вони здебільшого подібні до кривих φ_p (рис. 2), але відрізняються значно стрімкішим падінням за $e_{np} \approx 2...4\%$ і дещо сильнішим зростанням за $e_{np} > 5\%$.

Криві ψ_p (рис. 4), побудовані згідно з формулою 4 [3], вже не мають такого чіткого поділу на зони «розміцнення» та «зміцнення», як це мало місце у випадку навантажування зразків тільки розтягом [3]. У будь-якому випадку пограничне значення ε_p^o суттєво зміщене вліво, і зона «розміцнення» значно менша, ніж на рис. 4 [3].

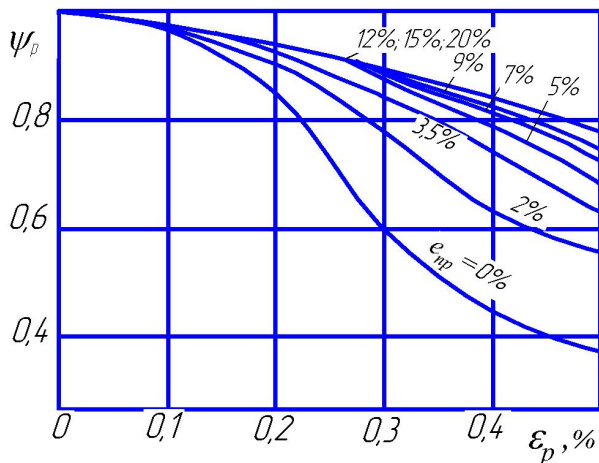


Рисунок 4 — Вплив проміжного стиску ($\sigma_c = -100$ МПа) на залежність відносної зміни модуля E_p сталі 17Г1С від величини відносного видовження ε_p за різних значень попередньої пластичної деформації e_{np}

У випадку знакозмінного циклу навантаження «зміцнення» матеріалу починається за менших значень розтягуючого напруження (менших ε_p). Тому втомне руйнування за дії знакозмінного циклу повинно наставати за напружень, менших ніж для пульсуючого циклу.

Відносна зміна модуля стиску для матеріалу, наклепаного розтягом, обчислювалась за формулою

$$\psi_c = \frac{E_c}{E_{\max}} \quad (2)$$

Залежності ψ_c зображено на рис. 5. Найбільш різке зниження відбувається за $e_{np} \approx 2\%$, відтак настає суттєве підвищення – до

$e_{np} \approx 9\%$. Подальше зростання e_{np} до 20% практично не впливає на ψ_c .

Наступна партія зразків досліджувалась так само, як попередня, тільки величина напружень стиску була збільшена удвічі і складала $\sigma_c = -200$ МПа.

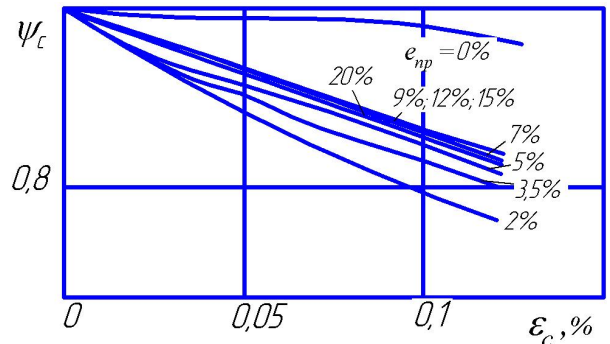


Рисунок 5 — Залежність відносної зміни модуля стиску E_c сталі 17Г1С від величини відносного стиску ε_c за різних значень попередньої пластичної деформації e_{np} ($\sigma_c = -100$ МПа)

Криві січних модулів після наклепу залежно від e_{np} зображено на рис. 6. Їх величина виявилася майже такою ж, як і у попередньому випадку, коли $\sigma_c = -100$ МПа (див. рис. 1). Кількісні відмінності зводяться до такого: спостерігається різке зниження E_p , яке при $\varepsilon_p = 0\%$ сягає 15%; величина модуля E_c , навпаки, дещо підвищується.

Для порівняння, на рис. 7 зображено криві E_p за $\varepsilon_p = 0\%$ для трьох випадків випробувань зразків, взятих з рисунків 2 [3], 1 і 6.

За прийнятою вище методикою побудовано криві φ_p і φ_c (рис. 8 і 9).

Криві ψ_p і ψ_c , побудовані за формулами (4) [3] і (2), свідчать (рис. 10 і 11), що збільшення напружень стискання зменшує зону «розміцнення», зсуваючи пограничне значення ε_p^o лівіше (рис. 10). На рис. 11 виявлено точку перетину кривої ψ_c матеріалу без наклепу з кривими наклепаного матеріалу. Це свідчить про те, що і в зоні стиску можливе «розміцнення» і «зміцнення» матеріалу. Проте таке трапляється лише за високих значень ступенів наклепу. За малих значень e_p наклеп відбувається до зменшення E_c , тобто «розміцнення».

Графіки на рис. 12 засвідчують сильний вплив наклепу e_p на границю пропорційності під час стискання, яка зменшується більш як утричі за порівняно малих значень наклепу ($e_{np} = 1...2\%$), а потім залишається постійною.

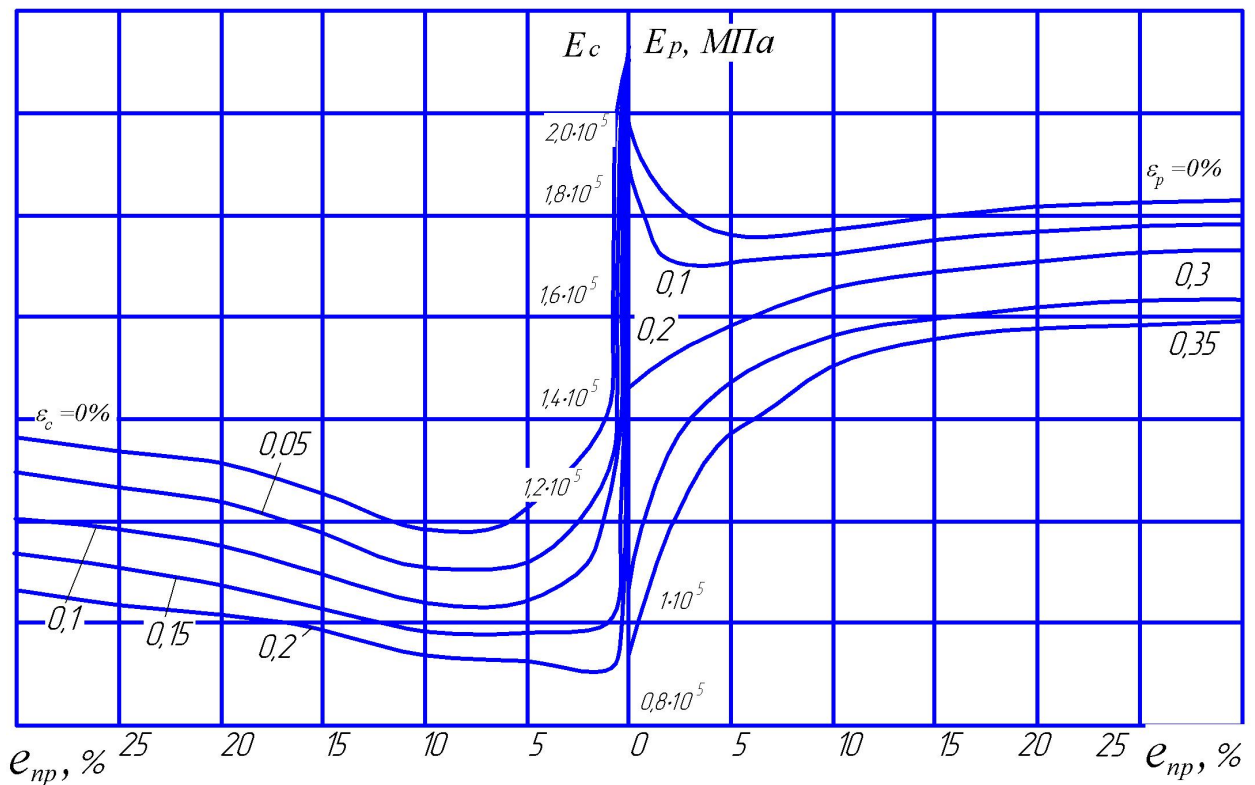


Рисунок 6 — Залежності січних модулів розтягу E_p і стиску E_c сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації розтягом e_{np} за різних значень відносного видовження ε_p і відносного стиску ε_c ($\sigma_c = -200 \text{ МПа}$)

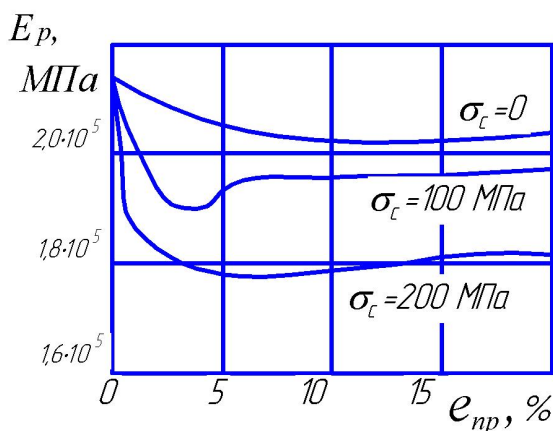


Рисунок 7 — Вплив попереднього пластичного деформування e_{np} і величини напружень стиску на характер кривих E_p (за $\varepsilon_p = 0$)

Майже повна відсутність в літературі даних про експериментальні дослідження впливу пластичних деформацій стиску на пружні властивості матеріалів пояснюється великими труднощами, що виникають у ході цього експерименту. Дуже складно стиснути зразок з напруженнями вище границі плинності та уникнути його викривлення. Особливо складно зробити це для довгих зразків, які після стискання слід випробувувати на розтяг.

Конструкція зразка, що дала змогу провести таке дослідження, зображена на рис. 13. Довжина робочої частини допускає установку

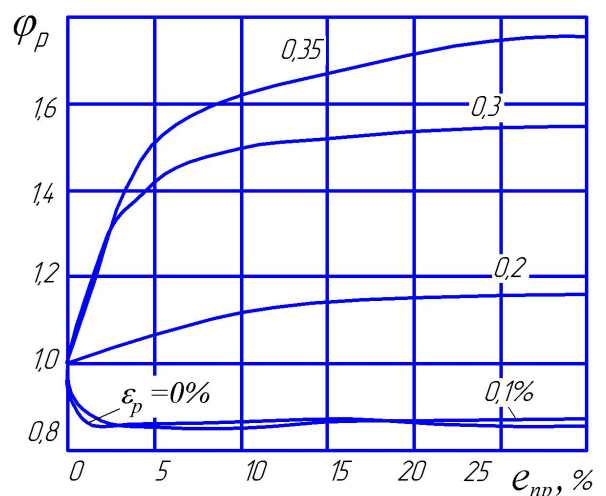


Рисунок 8 — Вплив проміжного стиску ($\sigma_c = -200 \text{ МПа}$) на залежність відносної зміни модуля E_p сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації e_{np} за різних значень відносного видовження ε_p

дзеркального тензометра з базою 50 мм. Спроби збільшити довжину призвели до викривлення зразка під час пластичного деформування. Товщина стінок вибрана так, щоб виключити можливість місцевої втрати стійкості. Кінці зразка оснащені масивними головками з різьбою, в яку вкручуються перехідники, що закріплюються в захватах випробувальної машини.

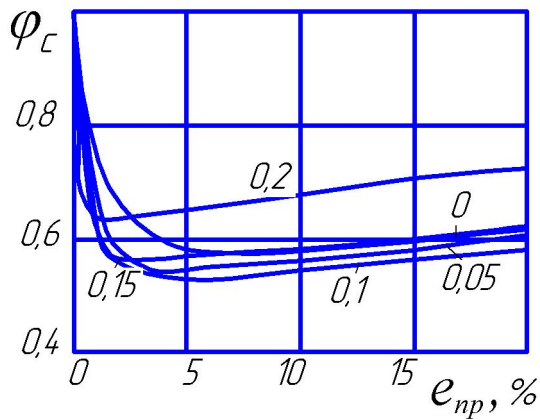


Рисунок 9 — Залежність відносної зміни модуля стиску сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації e_{np} за різних значень відносного стиску ($\sigma_c = -200 \text{ МПа}$)

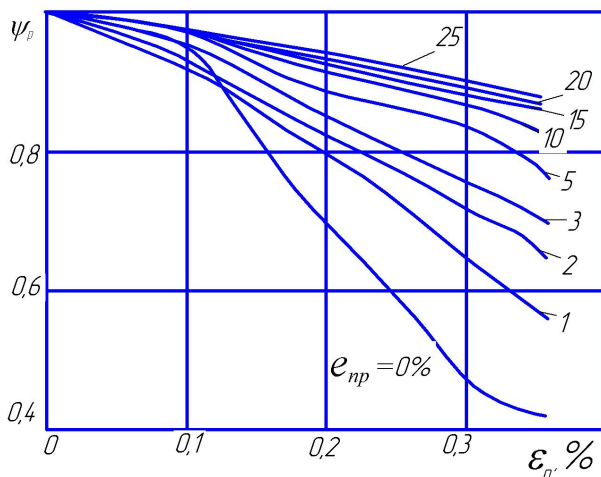


Рисунок 10 — Вплив проміжного стиску ($\sigma_c = -200 \text{ МПа}$) на залежність відносної зміни модуля E_p сталі 17Г1С від величини відносного видовження ϵ_p за різних значень попередньої пластичної деформації e_{np}

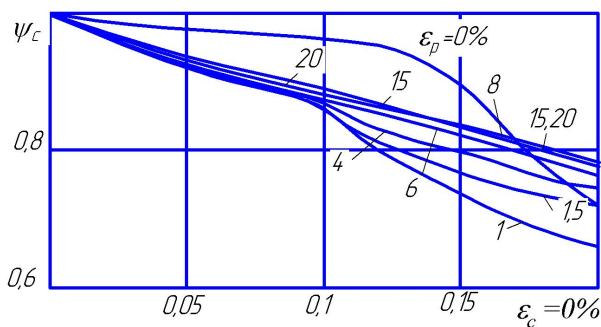


Рисунок 11 — Залежність відносної зміни модуля стиску E_c сталі 17Г1С від величини відносного стиску ϵ_c за різних значень попередньої пластичної деформації e_{np} ($\sigma_c = -200 \text{ МПа}$)

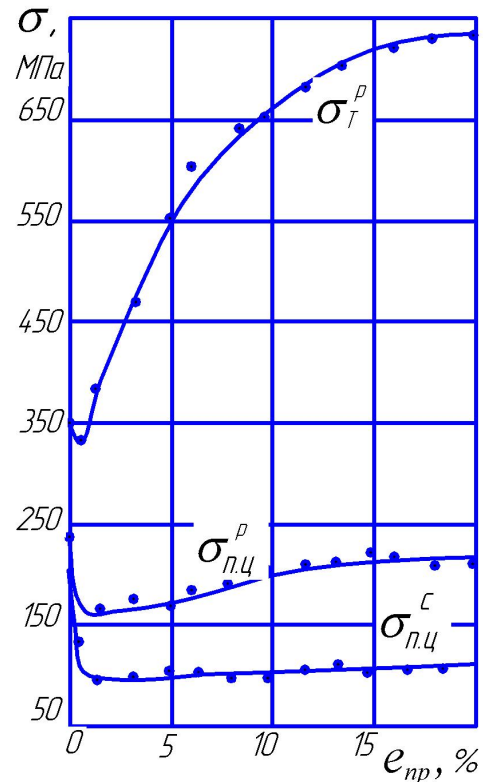


Рисунок 12 — Залежності $\sigma_{m_i}^p$, $\sigma_{m_i}^c$ і σ_T^p сталі 17Г1С від величини наклепу розтягом

Переріз зразка в головках в п'ять разів більший, ніж в робочій частині. Зразок виконаний зі сталі 20. Перелічені заходи виключають можливість виникнення пластичних деформацій в головках і перехідниках навіть тоді, коли залишкова деформація робочої частини прямує до 10%.

Крива $\sigma_{m_i}^p$ на рис. 12 засвідчує значно сильніший спад границі пропорційності за наявності стискаючих напружень, ніж у разі простого наклепу розтягом (рис. 5 [3]). Вона швидко досягає мінімального значення (за $e_{np} = 0,5 \dots 1\%$). Подальше збільшення наклепу призводить до повільного зростання $\sigma_{m_i}^p$, чого не спостерігалось у ході випробовувань зразків за $\sigma_c = 0$ (рис. 5 [3]).

Спочатку визначалися модулі пружності у процесі розтягування та стиснення зразків без залишкових пластичних деформацій. Їх величини були рівними $E_p = E_c = 2,02 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Потім зразку надавали пластичної деформації стиску наперед заданої величини (порядку $e_{nc} = 0,5\%$). Після цього визначався січний модуль розтягу E_p матеріалу, наклепаного стиском (максимальне напруження розтягу складало 120 МПа, тобто було набагато меншим від границі пропорційності вихідного матеріалу). Зразок, не отримавши залишкової пластичної деформації розтягу, розвантажувався до нуля, а потім стискався до заданого навантаження, що давало приріст пластичної деформації стиску.

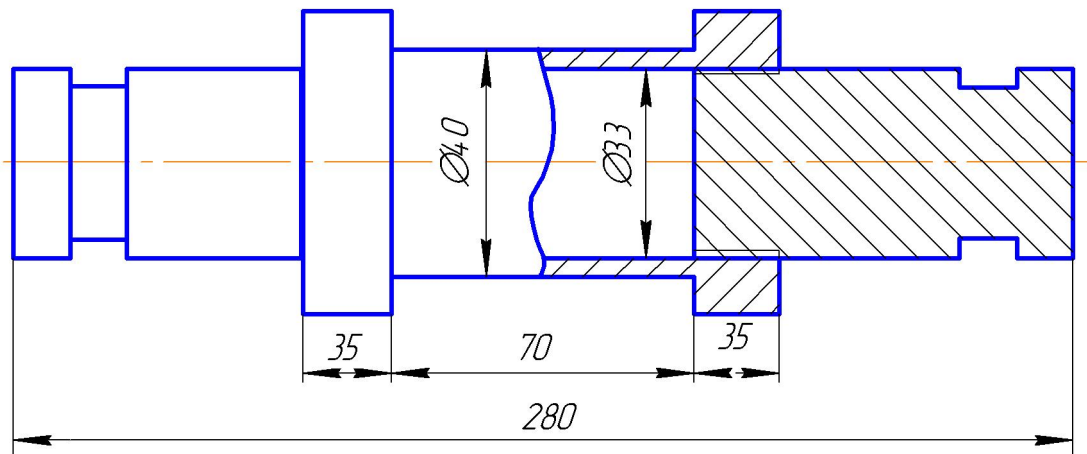


Рисунок 13 — Схематичне зображення зразка для механічних випробовувань на «стискування-розтягування»

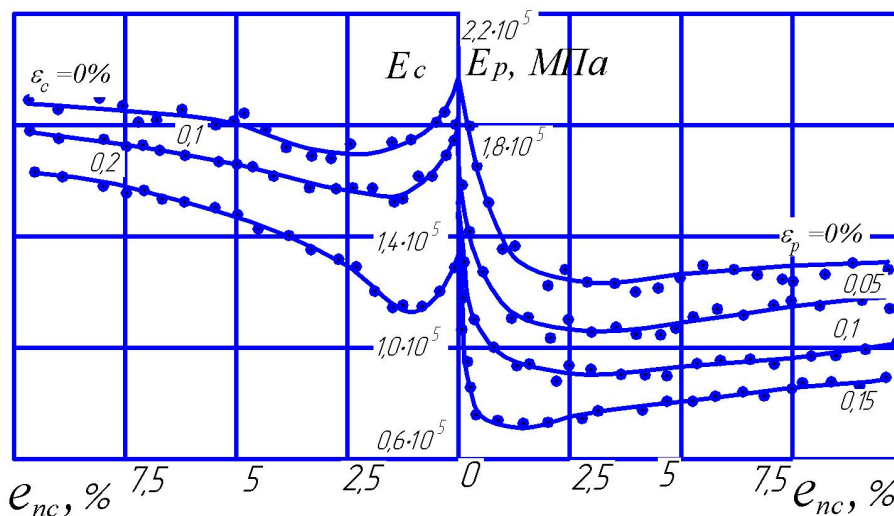


Рисунок 14 — Залежність січних модулів розтягу E_p і стиску E_c сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації стиском e_{nc} за різних значень відносного видовження ε_p і відносного стиску ε_c

В процесі навантаження проводились вимірювання для визначення модуля стиску E_c на початковій ділянці діаграми наклепаного матеріалу. Навантаження прикладалося доти, поки сумарне залишкове укорочення зразка не прямувало до 10%.

Графіки кривих E_p і E_c в функції e_{nc} зображені на рис. 14. Порівнюючи рис. 6 і 14, бачимо, що вплив наклепу стиском на січний модуль практично не відрізняється від впливу наклепу розтягом. Проте наклеп стиском викликає суттєве падіння модуля стиску E_c . Найбільше падіння E_c сягає 12...15% за $e_{nc} = 1...1,5\%$ (для $\varepsilon_c = 0$).

Як і у випадку наклепу розтягом, пластична деформація набагато сильніше впливає на модуль під час навантажування з протилежним знаком. Падіння E_p виявилось дуже різким (до 40% від початкової величини модуля). Мінімальні значення E_p досягаються за значно більших величин наклепу (при $e_{nc} = 3...4\%$). Збільшення E_p у разі зростання e_{nc} ($e_{nc} > 4\%$) незначне.

Падіння границі пропорційності під час стискування $\sigma_{mц}^c$, викликане пластичною деформацією стиску, виявилось значним: $\sigma_{mц}^c$ після наклепу $e_{nc} = 0,5\%$ складає лише 25...30% від значення $\sigma_{mц}$ вихідного матеріалу. Подальше збільшення наклепу призводить до незначного зростання $\sigma_{mц}^c$ (рис. 15). Як видно з рис. 15, ще більшого падіння зазнає границя пропорційності при розтягу $\sigma_{mц}^p$, що знаходиться у відповідності з ефектом Баушингера [4].

Отримані результати свідчать, що до зниження границі пропорційності призводить будь-яка пластична деформація, а не тільки пластична деформація протилежного знаку. Таким чином, ефект Баушингера є частковим вираженням загальної властивості сталей понижувати границю пропорційності при наклепі будь-якого знаку. Зміна знаку (перехід напружень через нуль) підсилює викривлення початкової ділянки діаграми, однак принципової різниці

між впливом пластичної деформації розтягу та стиску не встановлено.

Вплив наклепу змінного знаку досліджувався на трубчастих зразках (рис. 13). Пластичні деформації розтягу та стиску чергувалися таким чином, що сумарна деформація залишалася близькою до нуля. Тобто, довжина зразка в процесі випробовувань майже не змінювалась.

Спочатку зразок отримувал залишкову пластичну деформацію стиском, потім розвантажувался до нуля і наклепувався розтягом. В процесі розтягу заміряли модуль E_p матеріалу, наклепаного стиском. У процесі наступного навантаження на стиск замірювався модуль матеріалу, наклепаного розтягом (E_c).

На рис. 16 зображено діаграми розтягу та стиску вихідного матеріалу (криві 1 і 1') і криві наклепаного матеріалу (2, 2' і 3, 3'). Там вказані також величини границь пропорційності та плинності.

Невеликий наклеп розтягом і стиском (близько $\pm 1\%$) призводить до деякого зменшення границі плинності та значного падіння границі пропорційності (криві 2-2'). Початкові ділянки кривих 2-2' настільки сильно викривлені, що ділянка, яка відповідає закону Гука, практично відсутня.

Подальше накопичення змінної пластичної деформації призводить до вирівнювання початкової ділянки діаграми, значного підвищення границі плинності σ_T і деякого збільшення σ_{m1} (криві 3-3').

Нижче наведено величини вказаних характеристик:

Під час розтягу:

Крива 1: $\sigma_{m1} = 170$ МПа

$\sigma_{T1} = 250$ МПа

Крива 2: $\sigma_{m2} = 30$ МПа

$\sigma_{T2} = 210$ МПа

Крива 3: $\sigma_{m3} = 49$ МПа

$\sigma_{T3} = 270$ МПа

Під час стиску:

Крива 1': $\sigma'_{m1} = 170$ МПа

$\sigma'_{T1} = 250$ МПа

Крива 2': $\sigma'_{m2} = 46$ МПа

$\sigma'_{T2} = 226$ МПа

Крива 3': $\sigma'_{m3} = 60$ МПа

$\sigma'_{T3} = 284$ МПа

Змінна за знаком пластична деформація має також сильний вплив на січні модулі E_p і E_c , закони зміни яких в залежності від величини попередньої деформації e або e_{np} зображені на рис. 17.

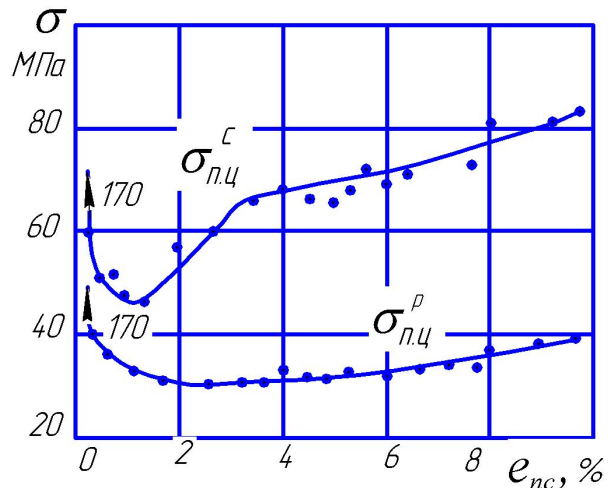


Рисунок 15 — Залежності σ_{m1}^c і σ_{m1}^p сталі 17Г1С від величини наклепу стиском e_{nc}

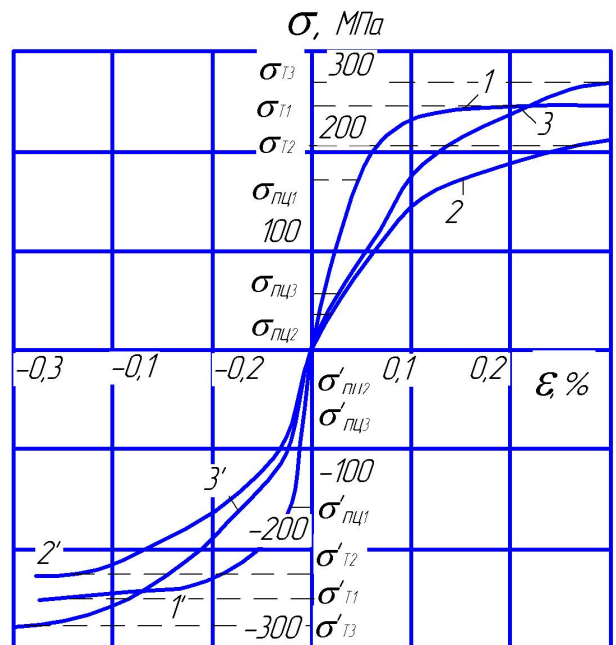


Рисунок 16 — Криві розтягу і стиску вихідного (1-1') та наклепаного (2-2', 3-3') матеріалів

Найменшого значення модулі набувають за $e_{np} = e_{nc} \approx 0,8...0,9\%$: зниження модулів становить $\sim 40\%$. Характер зміни E_p і E_c приблизно однаковий. Після досягнення мінімуму настає доволі швидко зростання, яке, однак, швидко призупиняється. Подальше пластичне деформування практично не змінює величину модуля.

Виявлені зміни пружних властивостей, викликані пластичною деформацією, не стабільні. З часом вони зникають, а матеріал поновлює початкові властивості, однак цей процес є тривалим, і для сталі 17Г1С складає від декількох діб до трьох-чотирьох тижнів.

Отримані дані про зміну модуля E пластично деформованого матеріалу можуть бути використані під час розв'язання задач, пов'язаних з одновісним напруженим станом. Дослідження

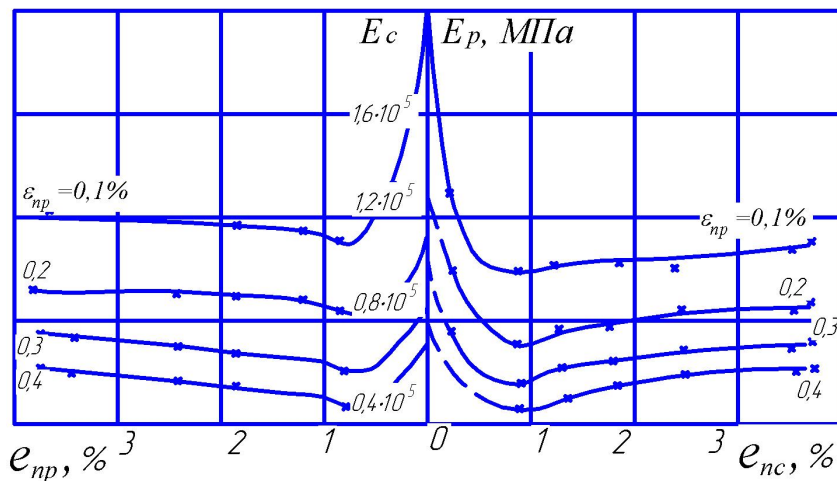


Рисунок 17 — Залежності січних модулів E_p і E_c від величини попередньої пластичної деформації e_{nc} і e_{np}

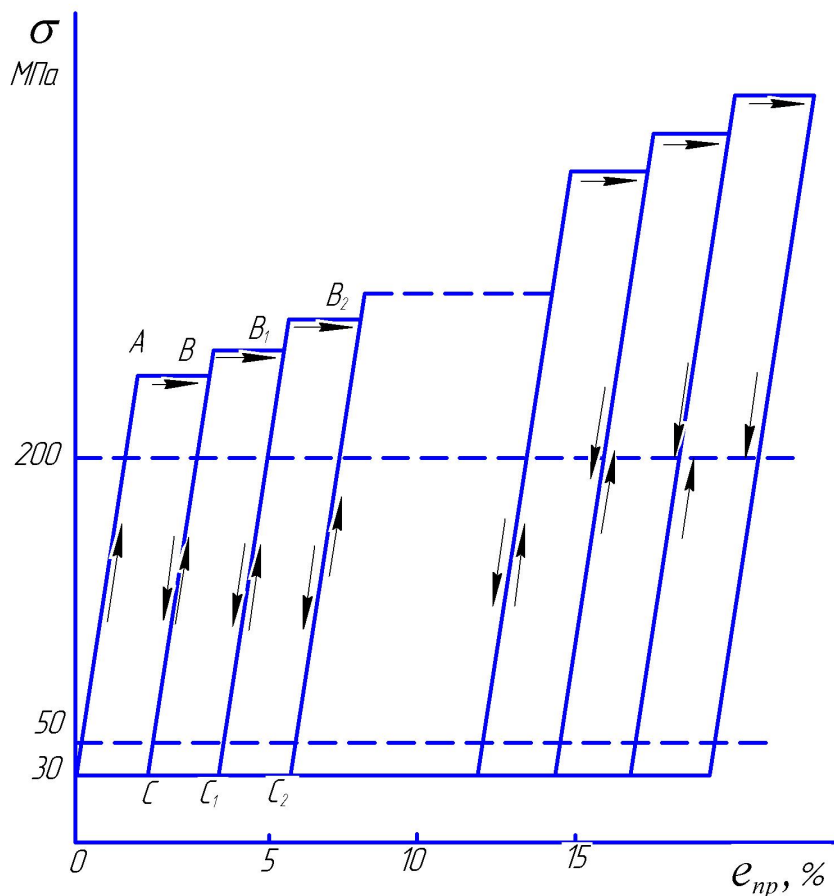


Рисунок 18 — Схема зміни навантаження на зразок сталі 20 (при дії тільки розтягуючих напружень)

плоского і об'ємного стану вимагає знання властивостей коефіцієнта поперечної деформації μ [5].

Експериментальне дослідження впливу пластичної деформації на величину μ проводилось на циліндричних зразках сталі 20. Схема зміни навантаження на зразок зображена на рис. 18. Спочатку зразок розтягували в пружній зоні OA і заміряли коефіцієнт μ несклепаного матеріалу при підвищенні розтягуючих напружень з

50 МПа до 200 МПа. Потім зразку надавалась деяка залишкова деформація розтягу e_{np} (ділянка AB), і навантаження понижувалося до 30 МПа (ділянка BC). Наклепаний зразок знову навантажували з метою заміру μ_p в тому ж діапазоні зміни напруження (від 50 МПа до 200 МПа). Відтак проводився додатковий наклеп на ділянці BV_1 з наступним розвантаженням до 30 МПа і новим заміром μ_p .

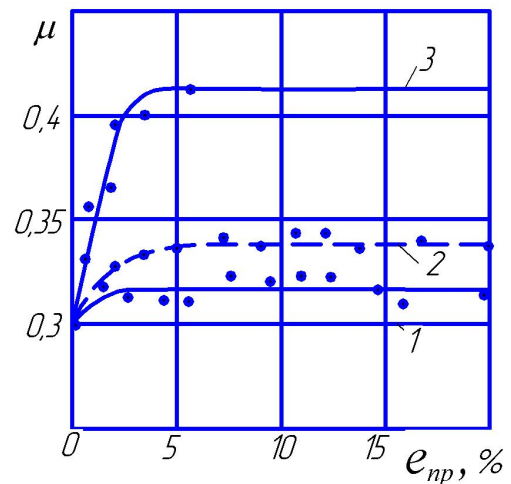
Ступінчасте навантаження за вказаною схемою продовжувалося до тих пір, поки сумарна залишкова деформація не досягла 20%.

Крива зміни μ_p для різних величин наклепу e_{np} зображена на рис. 19 (позиція 1). Пластична деформація в межах 1...3% призводить до незначного зростання μ_p . За більших значень залишкової деформації μ_p залишається практично постійним.

Наступну партію зразків випробовували на дію знакозмінного циклу. Вивчався вплив наклепу розтягом на коефіцієнт поперечної деформації при розтягу μ_p і стиску μ_c .

Схема зміни навантаження зображена на рис. 20. Ненаклепаний зразок розтягувався та стискався у пружній області для визначення μ_p і μ_c . Потім здійснювався наклеп розтягом (ділянка OAB) і розвантаження до нуля (лінія BC). Коефіцієнт μ_c вимірювався в інтервалі напружень стиску від 25 МПа до 75 МПа (на рис. 20 цей інтервал обмежений горизонтальними пунктирними лініями). Після розвантаження проводилось визначення μ_p в інтервалі зміни розтягуючих напружень від 50 МПа до 200 МПа (інтервал обмежений пунктирними лініями). Відтак пластична деформація збіль-

шувалася шляхом навантажування вздовж лінії BB_1 і після розвантажування визначалися значення μ_c і μ_p при новому значенні наклепу. Випробування продовжувалося до тих пір, поки залишкова деформація не ставала рівною близько 25%.



1 – після дії лише розтягуючих напружень; 2 і 3 – після дії знакозмінного циклу відповідно при розтягу та стиску

Рисунок 19 — Вплив наклепу розтягом зразків сталі 20 на величину коефіцієнта поперечної деформації

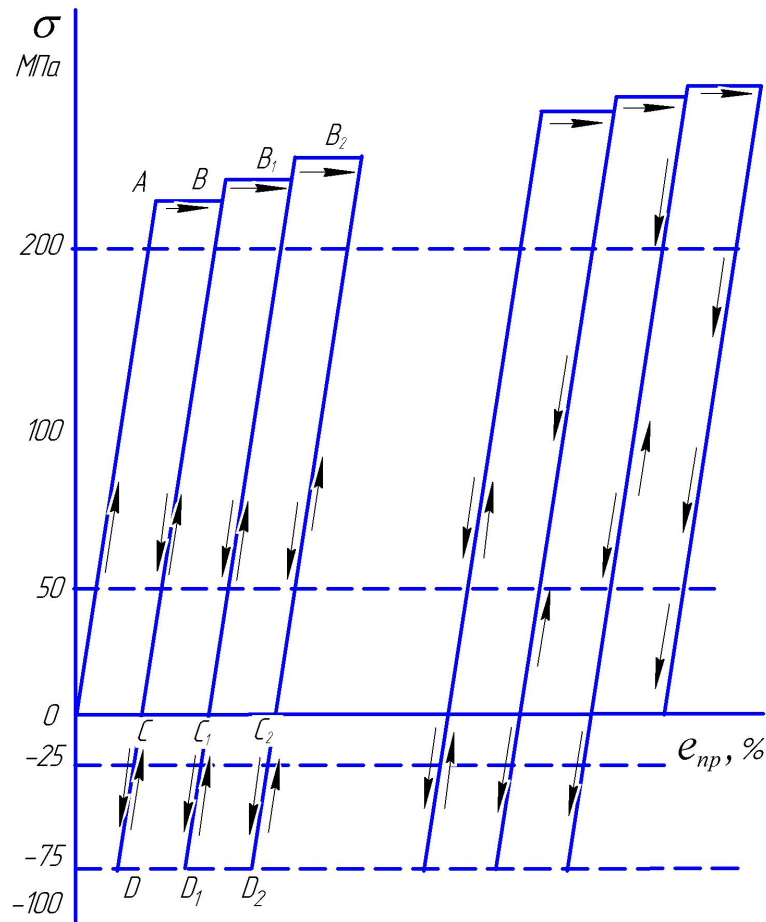


Рисунок 20 — Схема зміни навантаження на зразок сталі 20 (під час розтягу та стиску)

Результати зображено на рис. 19, де верхня крива 3 відповідає закону зміни коефіцієнта поперечної деформації під час стискання – μ_c , а нижня крива 2 – того ж коефіцієнта під час розтягування – μ_p . В обох випадках зафіксоване помітне зростання μ за невеликих величин наклепу, після чого μ залишається практично постійним. Як і у випадку модуля Е, вплив наклепу протилежного знаку проявляється сильніше. Наклеп розтягом підвищує коефіцієнт поперечної деформації при стиску приблизно на 40%, а при розтягу – тільки на 10...12%. Відзначимо, що останнє підвищення було все ж значно більшим порівняно зі зростанням μ_p , отриманим у ході навантаження зразка за схемою, зображеною на рис. 18. Це вказує на сильний вплив знакозмінності циклу навантаження на коефіцієнт поперечної деформації.

Отримані дані тісно пов'язані із закономірностями зміни модуля Е та коефіцієнтом поперечної деформації μ пластично деформованих матеріалів.

У всіх випадках зміна модуля проявляється протилежно зміні μ : пластична деформація сталі призводить до зменшення Е та збільшення μ .

Одночасна зміна Е і μ в протилежних напрямках свідчить про те, що наклеп впливає на процеси, які змінюють інтенсивність тої складової деформації, що відбувається без зміни об'єму металу.

Всяку деформацію можна вважати складеною з двох частин, одна з яких викликається пружним спотворенням ґратки (для металів їй відповідає коефіцієнт поперечної деформації $\mu_{np} = 0,25...0,35$), а друга протікає без зміни об'єму і зводиться до переміщення дислокацій всередині матеріалу (цій частині відповідає коефіцієнт $\mu_{nl} = 0,5$) [5]. Другу частину зазвичай утворюють з пластичною, незворотною деформацією, однак це не зовсім точно. Насправді деяка частина дислокацій, затримана односторонніми перешкодами всередині зерен, опиняється в нестабільному стані, і у ході розвантаження зразка може повернутися у вихідне положення. Переміщення таких дислокацій при навантаженні та розвантаженні викликає появу непружних, але зворотних деформацій, які протікають без спотворення ґратки та без зміни об'єму.

Оскільки сталі володіють сильно розвинутою субструктурою – правильною ґраткою, складеною із взаємногальмівних дислокацій, то в нормальному стані виявляється дуже мало дислокацій, які здатні здійснювати зворотні переміщення. За малих напружень деформації сталі мають чисто пружний характер.

Пластична деформація руйнує вихідну субструктуру сталі, збільшуючи кількість незакріплених дислокацій. Це призводить до падіння модуля Е і зростання коефіцієнта поперечної деформації. Довготривалий відпочинок або

відпалювання сталі сприяє поновленню дислокаційної ґратки та відновленню властивостей.

Наявність взаємозв'язку між закономірностями впливу пластичної деформації на Е і μ дає можливість скоротити об'єм експерименту, обмежившись тільки визначенням змін модуля Е. Коефіцієнт поперечної деформації можна визначити розрахунковим шляхом, спираючись на дані експерименту, що стосується модуля.

З достатньою точністю можна вважати, що для більшості металів пружним деформаціям відповідає коефіцієнт $\mu_{np} = 0,3$. З появою пластичних деформацій відбуваються незворотні зсуви, що протікають практично без зміни об'єму, тобто при $\mu_{nl} = 0,5$. Результируючу величину коефіцієнта поперечної деформації можна обчислити за відомим співвідношенням між пружною та пластичною деформаціями. Це співвідношення легко знайти за відомою зміною модуля Е.

Нехай, наприклад, січний модуль сталі при наклепі розтягом зменшився з $2 \cdot 10^5$ МПа до $1,65 \cdot 10^5$ МПа. Повне видовження наклепаної сталі Δl складається з пружного видовження Δl_{np} і видовження Δl_{nl} , викликаного пластичною деформацією:

$$\Delta l = \Delta l_{np} + \Delta l_{nl} \quad (3)$$

Оскільки видовження оберненопропорційне модулю, то

$$\frac{k}{E} = \frac{k}{E_{np}} + \Delta l_{nl} \quad (4)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від величини навантаження та розмірів зразка.

Підставивши числа, отримали

$$\frac{1}{1,65 \cdot 10^5} = \frac{1}{2 \cdot 10^5} + \frac{\Delta l_{nl}}{k};$$

$$\Delta l_{nl} = k \cdot 0,106 \cdot 10^5.$$

Частка пластичної деформації складає:

$$x = \frac{\Delta l_{nl}}{\Delta l} = \frac{\Delta l_{nl}}{k} = 0,106 \cdot 10^5 \cdot 1,65 \cdot 10^5 = 0,175.$$

Очікувана зміна коефіцієнта поперечної деформації після наклепу розтягом дорівнює:

$$\mu_p = \mu_{np} (1 - x) + \mu_{nl} \cdot x =$$

$$= 0,3(1 - 0,175) + 0,5 \cdot 0,175 = 0,335.$$

Цей результат добре зіставляється з найбільшим експериментальним значенням μ (рис. 19, крива 1).

Після наклепу розтягом модуль під час стискання знижується більш різко: з $2 \cdot 10^5$ МПа приблизно до $1,1 \cdot 10^5$ МПа. Тому слід очікувати стрімкішого зростання коефіцієнта поперечної деформації при стиску μ_c .

Використовуючи формули (3) і (4), отримуємо:

Література

$$\frac{k}{1,1 \cdot 10^5} = \frac{k}{2 \cdot 10^5} + \Delta L_{nl};$$

$$\Delta L_{nl} = k \cdot 0,408 \cdot 10^{-5};$$

$$x = \frac{\Delta L_{nl}}{\Delta L} = 0,408 \cdot 10^{-5} \cdot 1,1 \cdot 10^5 = 0,45;$$

$$\mu_c = 0,3(1 - 0,45) + 0,5 \cdot 0,45 = 0,39.$$

Отриманий результат також добре збігається з експериментальним значенням найбільшого коефіцієнта μ_c на рис. 19 (крива 3).

Таким чином, за наявності надійних даних щодо впливу наклепу на модуль Е можна не проводити більш складних дослідів для експериментального визначення μ , а використати запропоновану вище методику для обчислення коефіцієнта поперечної деформації.

Висновки

Вплив пластичної деформації трубних сталей 17Г1С і 20 проявляється незалежно від знаку напружень, які викликають наклеп. Якщо знак пластичної деформації та знак напружень, за яких визначається січний модуль, співпадають, то падіння модуля проявляється не надто сильно і складає 5...15%. У випадку наклепу протилежного знаку відбувається значне зниження модуля (до 30...40%).

Перехід від пульсуючого циклу навантаження під час наклепу до знакозмінного циклу призводить до різкого зменшення модуля та границі пропорційності, навіть якщо напруження протилежного знаку не перевищують границі пропорційності вихідного матеріалу.

Встановлено вплив пластичної деформації на величину коефіцієнта поперечної деформації сталі. Отримано зв'язок між зміною Е і μ і подано якісне пояснення впливу наклепу з точки зору дислокаційної структури металу. Зміна коефіцієнта μ виявляється протилежною зміні січного модуля Е.

Зміна μ суттєво залежить від знаку пластичної деформації. Наклеп протилежного знаку має значно відчутніший вплив. Наприклад, наклеп розтягом збільшує μ сталі під час розтягування на 6...8%, а під час стискання – на 12%.

Отримані дані розширюють і узагальнюють уявлення про явище, відоме під назвою „ефекта Баушингера”.

Встановлені закономірності зміни Е і μ можуть бути застосовані для визначення несучої здатності деталей, що підлягають дії навантажень, що змінюються у часі.

1 Крижанівський Є.І. Вплив попереднього пластичного деформування на механічні характеристики сталі 17Г1С-У / Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онишук, Ю.Д. Петрина // Наукові нотатки ЛДПІ. – Луцьк. – 2003. – Вип. 13. – С. 150-159.

2 Крижанівський Є.І. Кінетика деформування сталі трубопроводу при низькочастотній втомі / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – № 1. – С. 62-67.

3 Петрина Д.Ю. Вплив наклепу розтягом на механічні характеристики трубних сталей 17Г1С та 20 / Д.Ю. Петрина // Машинознавство. – 2008. – № 4. – С. 30-33.

4 Фридман Я.Б. Механические свойства металлов: В 2-х т. – Т. 1: Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

5 Кузьменко В.А. Новые схемы деформирования твёрдых тел / В.А. Кузьменко – К.: Наукова думка, 1973. – 200 с.

Стаття поступила в редакційну колегію
04.03.09

Рекомендована до друку професором
Є. І. Крижанівським