

III МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 620.178.3

Канд. техн. наук А. І. Сочава, канд. техн. наук Л. М. Мартовицький,
канд. техн. наук В. І. Глушко, Є. С. Кримов, Р. О. Фролов

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

ВПЛИВ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НА ВЕЛИЧИНУ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ

Проведені дослідження на опір втомі зразків з концентратором із сталі 09Г2С. Розглянуто механізм формування в зоні концентратора залишкових напружень в умовах асиметрії циклу. Представлені діаграми граничних амплітуд.

Ключові слова: асиметрія циклу, залишкові напруження, коефіцієнт концентрації.

Постановка проблеми

В практиці машинобудування деталі машин при проектуванні розраховують на опір втомі у відповідності до діючих в реальних умовах експлуатації подібних циклів з урахуванням коефіцієнта асиметрії. Довідкові джерела рідко надають дані про опір конструкційних матеріалів втомі при асиметричних циклах навантаження і обмежуються в основному симетричним циклом, оскільки даний режим навантаження не складно реалізувати на машинах системи Шенка (деформація згину з обертанням).

Рідкісними є також дані про опір конструкційних матеріалів втомі з наявністю концентраторів напружень, які мають місце у більшості деталей машин.

Місця з концентраторами напружень вважають небезпечними, оскільки вони найчастіше стають причинами відмови. Існує певний дефіцит теоретичних і практичних знань про опір втомі конструкційних матеріалів з концентраторами напружень. В роботі [1] вказується, що концентрація напружень впливає тільки на амплітуду і не залежить від рівня середніх напружень циклу, що на наш погляд є сумнівним, оскільки в умовах асиметрії циклу концентратори можуть сприяти релаксації напружень, що призводить до формування залишкових напружень, здатних впливати на довговічність деталі.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження впливу асиметрії циклу на величину ефективного коефіцієнта концентрації напружень низьколегованої сталі.

Зміст дослідження

У відповідності з метою роботи проведені дослідження плоских, з концентратором зразків зі сталі 09Г2С ($\sigma_s = 500$ МПа, $\sigma_T = 400$ МПа). Ця сталь є базовим конструкційним матеріалом для виготовлення металоконструкцій вантажопідійомних кранів. Зразки виготовлені із листа товщиною 5 мм поздовжнього прокату в

стані поставки. Ширина зразка – 25 мм, діаметр центрального отвору – 5 мм (теоретичний коефіцієнт концентрації напружень $\alpha_\sigma = 2,5$ [1]). Випробування проведені на установці, створеній в Запорізькому національному технічному університеті, яка дозволяє здійснювати випробування на опір втомі при будь-якому коефіцієнті асиметрії циклу при розтягуючих і стискаючих середніх напруженнях [2].

Дослідження виконані при наступних середніх напруженнях циклу: 0, +100, +200, +300, -100, -200 МПа. Результати експерименту представлені на рис. 1 у вигляді сімейства кривих втомі.

Аналіз кривих свідчить, що перегин їх у горизонтальне положення здійснюється при довговічності, близько $1,5 \cdot 10^6$ циклів навантаження. Взаємне розміщення кривих не викликає сумнівів. Криві при розтягуючих середніх напруженнях розміщуються під кривою втомі симетричного циклу, а криві втомі при стискаючих середніх напруженнях σ_m розташовані вище.

Виникає питання щодо наукових пояснень причин перетину кривих із середніми напруженнями розтягання 100 і 200 МПа при довговічності 10^6 циклів. Ймовірно дане явище можна пояснити особливостями дії пластичних деформацій. Відомо, що малі пластичні деформації розтягання знижують втомну міцність металу, а значні, навпаки, його зміцнюють. При $\sigma_m = 100$ МПа і амплітуді $\sigma_a = 80$ МПа зразки мають сумарне напруження $\sigma_{\max} = 180$ МПа, яке в зоні концентратора при теоретичному коефіцієнті концентрації $\alpha_\sigma = 2,5$ може створити локальне напруження 450 МПа, що буде причиною невеликих пластичних деформацій розтягання.

По кривій втомі 3 (рис. 1), що відповідає $\sigma_m = 200$ МПа і $\sigma_a = 80$ МПа, максимальні напру-

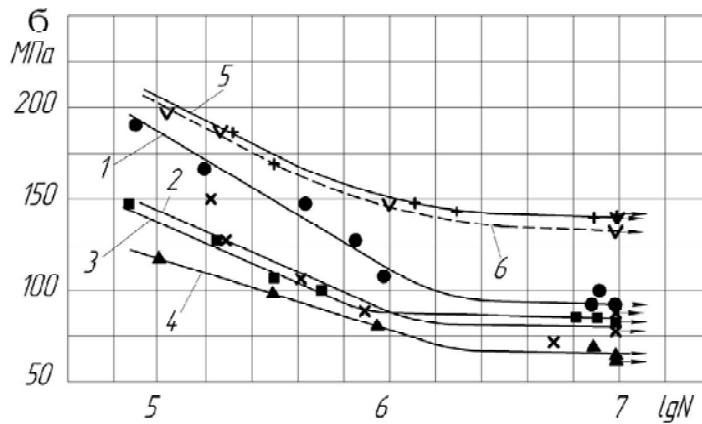


Рис. 1. Криві втоми зразків з концентратором: 1 – при $\sigma_m = 0$; 2 – 100 МПа; 3 – 200 МПа; 4 – 300 МПа; 5 – (-100 МПа); 6 – (-200 МПа)

ження в зоні концентратора можуть досягати величини 700 МПа. Ці напруження можуть призвести до місцевого зміцнення матеріалу зразка, як завдяки наклепу, так і внаслідок релаксації напружень.

При цьому виникають стискаючі залишкові напруження, які декілька зменшують напруження розтягання та створюють сприятливі умови для підвищення опору втоми матеріалу зразка.

На рис. 2 представлені діаграми граничних амплітуд зразків суцільних та з концентратором для кривих однакової довговічності 10^6 і 10^7 циклів, де 1 – суцільні зразки для 10^6 циклів, 2 – суцільні зразки для $N = 10^7$ циклів, 3 – зразки з концентратором для $N = 10^6$ циклів, 4 – зразки з концентратором для $N = 10^7$ циклів.

Криві суцільних зразків побудовані за даними роботи [3]. Криві зразків з концентратором є результатом даного дослідження, побудовані на підставі сімейства кривих втоми (рис. 1).

Для апроксимації кривих однакової довговічності гладких зразків використана формула [4]

$$\sigma_a^{(N)} = \sigma_{-1}^{(N)} \cdot \left(\frac{LgN}{LgN_B} \right)^{\frac{2\sigma_m}{\sigma_s - \sigma_{sc}}} \times \frac{(\sigma_m - \sigma_s)(\sigma_m - \sigma_{sc})}{\sigma_s \sigma_{sc}}, \quad (1)$$

де $\sigma_a^{(N)}$ – амплітуда циклу при даній розрахунковій довговічності N циклів, МПа;

$\sigma_{-1}^{(N)}$ – границя витривалості симетричного циклу при розрахунковій довговічності N , МПа;

N_B – база випробувань до необмеженої витривалості (для сталі $N_B = 10^7$ циклів);

σ_s – границя міцності при розтяганні, МПа;

σ_{sc} – границя міцності при стисканні (приймається зі знаком «-»), МПа.

На основі даної діаграми граничних амплітуд можна оцінити значення ефективного коефіцієнта концентратора напружень k_σ і коефіцієнта чутливості до концентратора q_σ в залежності від величини σ_m . Результати оцінки зведені до табл. 1. В таблиці σ_{ak} – значення амплітуди циклу зразків з концентратором.

Коефіцієнт чутливості до концентратора напружень визначено за формулою [1]

$$q_\sigma = (k_\sigma - 1) / (\alpha_\sigma - 1). \quad (2)$$

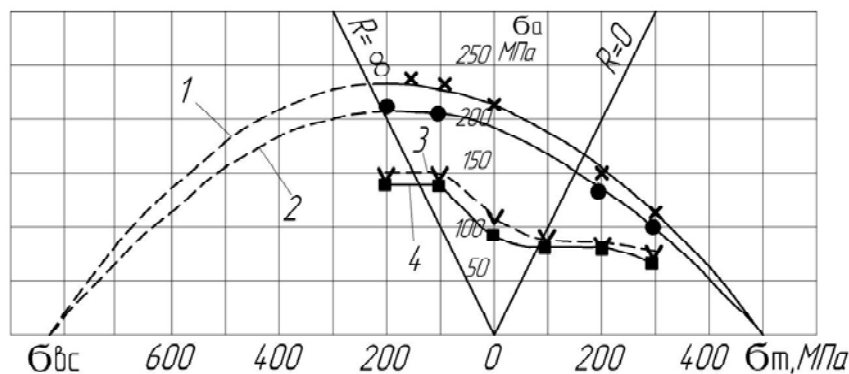


Рис. 2. Діаграми граничних амплітуд сталі 09Г2С

Таблиця 1 – Оцінка ефективного коефіцієнта концентрації напружень

σ_m , МПа	Циклів $N = 10^6$				Циклів $N = 10^7$			
	σ_a , МПа	σ_{ak} , МПа	k_σ	q_σ	σ_a , МПа	σ_{ak} , МПа	k_σ	q_σ
0	215	110,0	1,95	0,63	195	92,2	2,1	0,73
100	195	87,5	2,23	0,82	170	81,3	2,1	0,73
200	147	87,5	1,68	0,45	130	83,7	1,55	0,37
300	115	77,5	1,53	0,35	100	67,5	1,54	0,36
-100	235	152,5	1,54	0,36	208	142,5	1,46	0,31
-200	240	150,0	1,60	0,40	215	142,5	1,51	0,45

Як свідчить таблиця, то твердження, що ефективний коефіцієнт концентрації не залежить від середнього напруження циклу, а є залежним тільки від амплітуди, є сумнівним. Чутливість зразків до концентрації напружень найбільша при симетричному циклі і при $\sigma_m = 100$ МПа, коли ймовірність виникнення зміцнюючих факторів мала, а інтенсивність навантажень значна. При збільшенні асиметрії циклу з'являються сприятливі умови для підвищення опору втомному руйнуванню виробу, завдяки зміцнюючим факторам, якими можуть бути залишкові напруження і наклеп.

Розглянемо гіпотетичний механізм формування залишкових напружень та їх вплив на напружений стан зразків при симетричному навантаженні і в умовах асиметрії циклу.

Симетричне навантаження

Механізм формування напруженого стану та епюри напружень зразка в місці концентратора при симетричному циклі представлено на рис. 3.

Припустимо, що первинне навантаження здійснює півцикл (амплітуда) розтягання. В зразку виникає напруження, яке відповідає епюрі 1 (рис. 3а). Місцеві напруження в зоні концентратора складають $\alpha_\sigma \cdot \sigma_a$, де σ_a – амплітуда напруження, визначеного за нетто-перетином.

Якщо $\alpha_\sigma \cdot \sigma_a$ перевищує границю текучості σ_T , то може відбутися релаксація напружень і епюра прийме вид 2. При знятті навантаження в зразку виникають залишкові напруження відповідно епюрі 3 (рис. 3б).

При черговому навантаженні амплітудою стиску маємо в зоні концентратора епюру 4 (рис. 3в), яка чисельно дорівнює епюрі 1, але з протилежним знаком. В результаті підсумовування епюр 3 і 4 маємо напруження зразка відповідно епюрі 5. Можна припустити, що в наступному півциклі розтягання в об'єкті випробувань виникнуть аналогічні перетворення і напруження епюри 5 створять залишкові напруження відповідно епюрі 6 (рис. 3г). В результаті складання епюри 6 з черговим

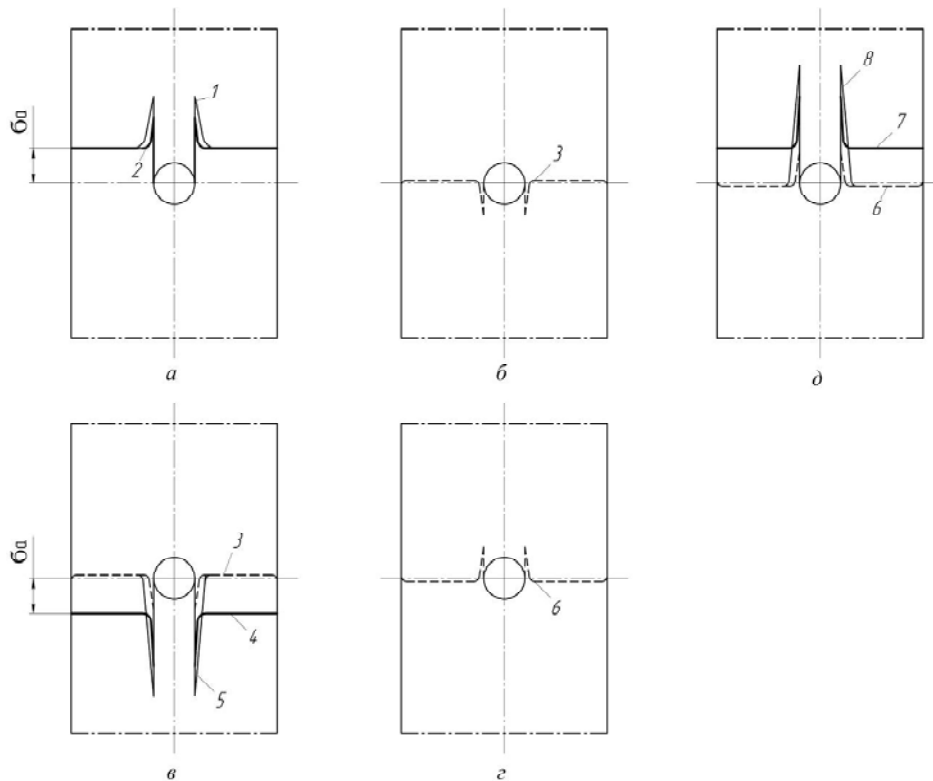


Рис. 3. Епюри напружень при симетричному циклі

півциклом розтягання, представленого епюрою 7 (рис. 3д), можна очікувати напруження, які відповідають епюрі 8. Остання є симетричною епюрі 5, розміщеною в зоні розтягання.

Отже, в зоні концентратора півцикли розтягання породжують (додаткові) залишкові напруження стискання для півциклу стискання, а півцикли стискання формують (додаткові) залишкові напруження розтягання для півциклу розтягання, збільшуючи при цьому амплітудні напруження циклу на величину залишкових напружень. Тобто, фактичні амплітуди циклу в зоні концентратора будуть більші, ніж розрахункові за нетто-перетином, що посилює вплив концентрації напружень.

Асиметричне розтягання

Розглянемо гіпотетичний механізм формування залишкових напружень при віддільному розтяганні. Коefіцієнт асиметрії циклу $R = 0$. У відповідності до конструкції випробувальної машини навантаження зразка здійснюється за формулою

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin \omega t, \quad (3)$$

де σ_m – середнє напруження циклу (статична складова), МПа;

ω – кутова частота силосбуджуючої голівки, с^{-1} .

При випробуваннях з наявністю статичної складової, коли $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ перевищує границю текучості, можуть мати місце циклічна повзучість і релаксація напружень, які сформують залишкові напруження.

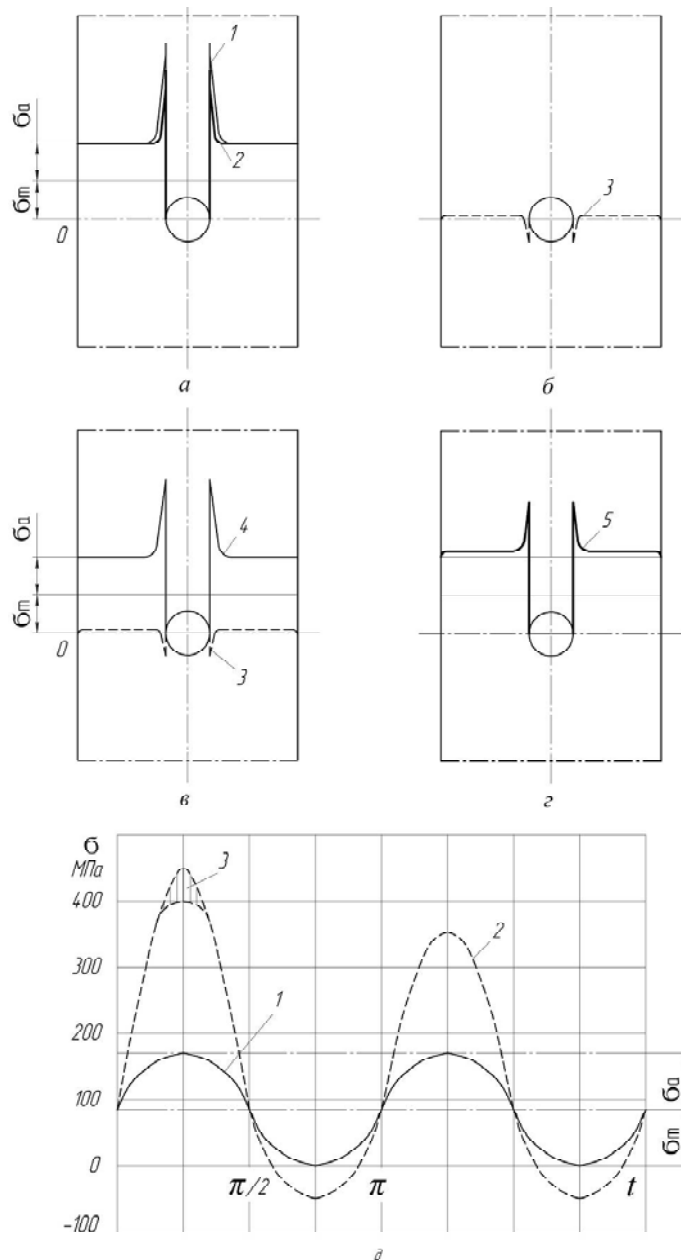


Рис. 4. Епюри напружень та графік навантаження зразка при $R = 0$

Очікуваний механізм формування залишкових напружень при віднульовому циклі розтягання представлено на рис. 4. Прийнято режим, що відповідає довговічності 10^6 циклів з напруженнями $\sigma_m = 90$ МПа, $\sigma_a = 90$ МПа, які визначені за нетто-перетином. При теоретичному коефіцієнті концентрації $\alpha_\sigma = 2,5$ пік напруження в зоні концентратора сягає величини $\sigma_{\max} = 450$ МПа, що перевищує границю текучості (рис. 4а).

Нехай при первинному навантаженні в указаній зоні відбувається релаксація напружень на 50 МПа (епюра 2) і в зоні концентратора залишається напруження зменшені до σ_T . При знятті навантаження в зразку виникають залишкові напруження стискування, які відповідатимуть епюрі 3 (рис. 4б). При повторному навантаженні в зоні концентратора будемо мати напруження, які відповідають значенню σ_T епюрі 4 (рис. 4в). В результаті підсумовування епюр 3 і 4 отримаємо епюру 5, пік якої зменшено на величину стискаючих напружень епюрі 3. При подальших навантаженнях в зоні концентратора буде мати місце напруження (епюра 5, рис. 4г). В півциклі розвантаження в зразку в зоні концентратора будуть виникати стискаючі напруження (епюра 3), а розтягаючи напруження, які притаманні решті перетину, будуть надто малі. Таким чином, стискаючі залишкові напруження відіграють позитивну роль, знижуючи основні напруження розтягання і тим самим зменшуючи вплив концентратора.

Суміщений графік навантаження зразка і напружень в зоні концентратора представлено на рис. 4д, де 1 – крива зовнішнього навантаження; 2 – апріорна крива напружень в зоні концентратора; 3 – зона релаксації.

Релаксація, яка відбувається лише при первинному навантаженні сприяє зниженню напруження в зоні концентратора і тим самим зменшує дію концентратора. Через наявність стискаючої складової в зоні концентратора режим стає не чисто віднульовим розтягання.

Асиметричне стискування

Для визначення впливу асиметрії циклу на концентрацію при середніх напруженнях стиску розглянемо механізм формування залишкових напружень при віднульовому стискуванні (коефіцієнт асиметрії $R = \infty$).

Приймаємо режим, що відповідає довговічності 10^7 циклів з параметрами: середнє напруження $\sigma_{m_c} = -140$ МПа, амплітуда $\sigma_a = 140$ МПа, які визначені за нетто-перетином.

Механізм формування та епюри залишкових напружень представлено на рис. 5.

При теоретичному коефіцієнті концентрації $\alpha_\sigma = 2,5$ максимальне напруження стискування в зоні концентрації дорівнює

$$|\sigma_{\max}| = \left(|\sigma_{m_c}| + \sigma_a \right) \cdot \alpha_\sigma = (140 + 140) \cdot 2,5 = 700 \text{ МПа}$$

Таке напруження на 300 МПа перевищує границю текучості, але менше границі міцності $\sigma_{sc} = -835$ МПа.

При даному напруженні ($\sigma_{\max} = -700$ МПа) в зоні концентратора здійснюються такі фізичні процеси: циклічна повзучість, ефект «кування», релаксація напружень. Все це породжує залишкові напруження, оскільки названі явища мають місцевий характер.

Вважаємо, що первинне навантаження здійснюється півциклом розтягання, що відповідає епюрі 1 (рис. 5а) ($\sigma_{\max_c} = -700$ МПа). В результаті приведених фізичних перетворень в зоні концентратора напруження знижуються до рівня $\sigma_{T_c} = -400$ МПа (епюра 2). При знятті навантаження в зразку виникають залишкові напруження, які відповідають епюрі 3 (рис. 5б). Приймаємо апріорі, що залишкові напруження в зоні концентратора складають 50 МПа, як і при віднульовому розтяганні. При повторному навантаженні попереднє напруження, яке виникло після релаксації (-400 МПа), буде зменшене на величину залишкових напружень (епюра 3, рис. 5в). Після складання епюр 3 і 4 отримаємо епюру 5 (рис. 5г).

Апріорний графік напружень зразка представлено на рис. 5д, де 1 – крива зовнішнього навантаження, 2 – апріорна крива напружень в зоні концентратора, 3 – пластична деформація.

Із рисунка видно, що напружений стан зразка фактично формується на перших двох циклах навантаження. Далі при навантаженні в зразку будуть виникати напруження, які відповідають епюрі 5, а при розвантаженні – епюрі 3. Таким чином, хоча зовнішнє навантаження не має розтягуючої складової, розтягуючи складову залишкових напружень (епюра 3) буде сприяти виникненню і розвитку тріщини втоми. Інтенсивність цих напружень є невелика, і розвиток тріщин буде гальмуватися стискаючою складовою циклу, в результаті чого вплив концентратора зменшується.

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень і теоретичних міркувань напрошується висновок, що з точки зору виникнення і дії залишкових напружень даний конструкційний матеріал є більш чутливим до дії концентратора при симетричному циклі навантаження. Тобто пошкодження від концентратора є більш дієвим при симетричному циклі, ніж коли матеріал працює в умовах асиметрії циклу.

Розглянемо залежність ефективного коефіцієнта концентрації від коефіцієнта асиметрії циклу. При цьому буде враховуватись вплив на ефективний коефіцієнт концентрації k_{σ_R} , як величина середнього напруження, так і амплітуда циклу. Діаграма вказаних залежностей представлена на рис. 6 для різних значень коефіцієнтів асиметрії R , які показані у вигляді променів, проведених під кутом γ , для якого $tg\gamma = (1 - R)/(1 + R)$.

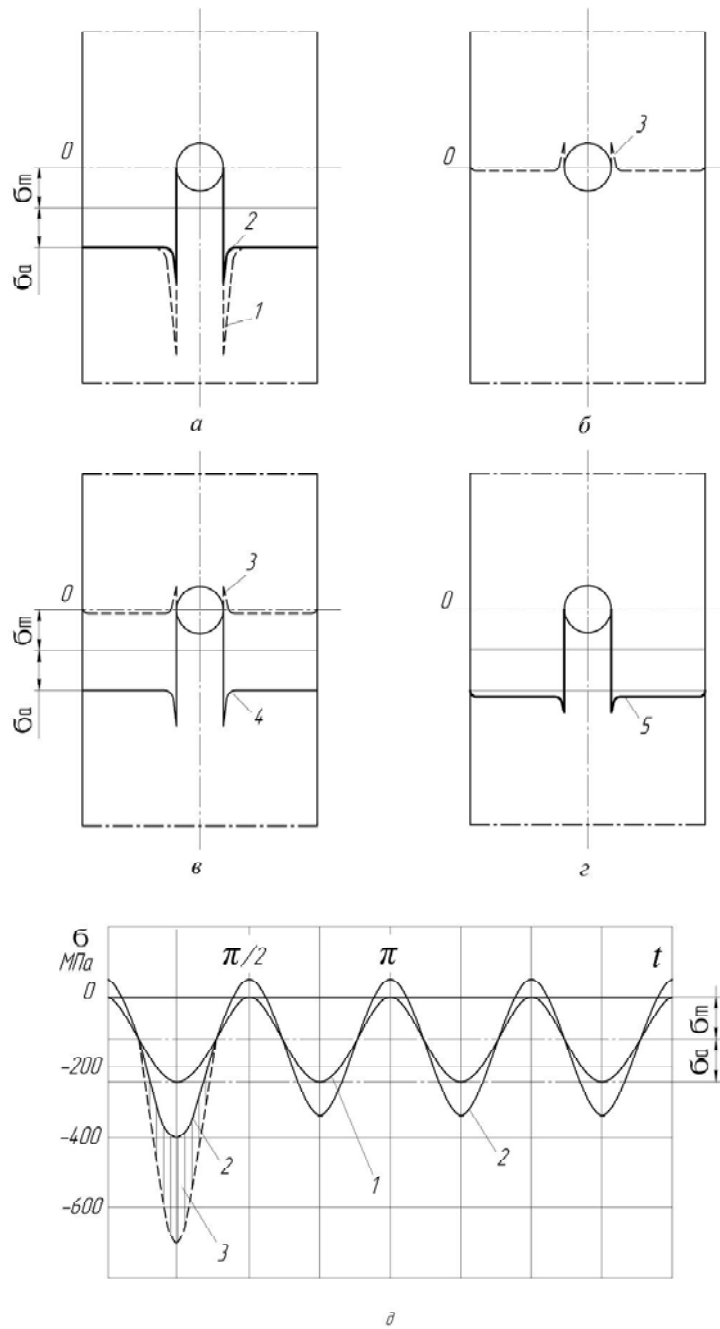


Рис. 5. Епюри напружень та графік навантаження зразка при

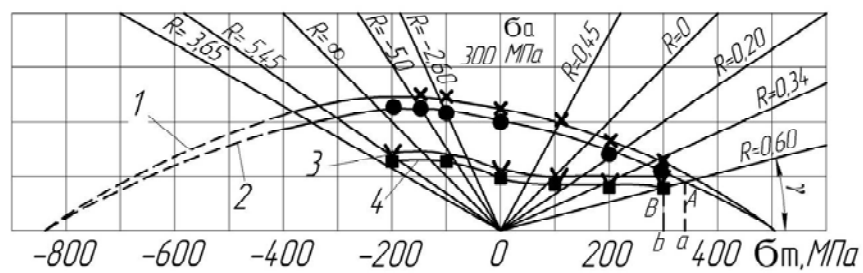


Рис. 6. Діаграма для визначення залежності ефективного коефіцієнта концентрації напружень від асиметрії циклу

На рис. 6 позначення кривих однакової довговічності аналогічно рис. 2. Апроксимація кривих однакової довговічності гладких зразків виконала також за допомогою формули (1).

Промені діаграми описуються формулою

$$\sigma_a^{(N)} = \frac{1-R}{1+R} \cdot \sigma_m. \quad (4)$$

Як приклад, розглянемо спосіб визначення ефективного коефіцієнта концентрації напружень в залежності від коефіцієнта асиметрії циклу для $R = 0,60$ при довговічності $N = 10^7$ циклів (рис. 6). Позначимо на діаграмі точки A і B перетину променя $R = 0,60$, з кривими однакоких довговічностей гладких зразків і зразків з концентратором.

Опустимо перпендикуляри Aa і Bb . Тоді ефективний коефіцієнт концентрації в залежності від коефіцієнта асиметрії циклу k_{σ_R} визначиться як відношення довжин відповідних відрізків

$$k_{\sigma_R} = \frac{Aa}{Bb} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{a_k}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{m_k}}, \quad (5)$$

де σ_a – гранична амплітуда для гладкого зразка, МПа;

σ_{a_k} – гранична амплітуда для зразка з концентратором, МПа;

σ_m – середнє напруження циклу для гладкого зразка, МПа;

σ_{m_k} – середнє напруження циклу для зразка з концентратором, МПа.

Визначені вказаним способом ефективні коефіцієнти концентрації k_{σ_R} для відповідних коефіцієнтів асиметрії циклу R зведені до табл. 2.

Результати оцінки свідчать, що найбільші значення k_{σ_R} мають місце при симетричному навантаженні і невеликій асиметрії (для $R = -0,45$, $R = -2,6$). При збільшенні асиметрії циклу значення k_{σ_R} зменшуються завдяки впливу залишкових напружень в зоні концентратора.

Висновки

Результати експериментальних досліджень та теоретичні основи механізму формування напруженого стану сталі 09Г2С з концентратором напружень, що приведені в даній роботі, можуть бути корисними конструкторам для більш повного використання службових характеристик конструкційних матеріалів з метою оптимізації маси і довговічності металоконструкцій кранів та інших виробів.

Список літератури

1. Серенсен С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
2. Стенд для испытания металлов при осевых нагрузках в условиях асимметрии цикла: Реферативная информация о законных научно-исследовательских работах в вузах УССР / Михайлов П. А., Сочава А.И. – К. : Вища школа, 1974. – Вып. 13.
3. Дослідження низьколегованих сталей на опір втомі в умовах асиметрії циклу / Сочава А. І., Глушко В. І., Мартовицкий Л. М., Курлаева Ю. С. // Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні. – 2012. – № 1. – С. 55–60.
4. Сочава А. І. Методика розрахунку деталей машин, що працюють в умовах нестационарного навантаження / Сочава А. І. // Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні. 2000. – № 2. – С. 66–68.

Одержано 08.06.2017

Таблиця 2 – Оцінка впливу асиметрії циклу на значення ефективного коефіцієнта концентрації напружень

R	Циклів $N = 10^6$				Циклів $N = 10^7$			
	σ_a , МПа	σ_{a_k} , МПа	k_{σ_R}	q_R	σ_a , МПа	σ_{a_k} , МПа	k_{σ_R}	q_R
-1	215	110	1,95	0,63	195	92,2	2,1	0,73
-0,45	195	95	2,05	0,70	170	80	2,12	0,75
0	175	100	1,75	0,5	150	80	1,87	0,58
0,2	150	90	1,67	0,45	135	78	1,73	0,49
0,34	125	90	1,39	0,26	119	80	1,47	0,31
0,60	90	80	1,13	0,09	82*	68	1,21	0,14
-2,60	230	130	1,75	0,5	210	110	1,91	0,60
-5,0	240	140	1,70	0,47	220	125	1,76	0,51
∞	235*	135	1,68	0,45	218	125	1,74	0,49
5,45	220*	135	1,63	0,42	200*	120	1,67	0,45

Сочава А.И., Мартовицкий Л.М., Глушко В.И., Кривов Е.С., Фролов Р.А. Влияние асимметрии цикла на величину эффективного коэффициента концентраций напряжений

Проведены исследования на сопротивление усталости образцов с концентратором со стали 09Г2С. Рассмотрен механизм формирования в зоне концентратора остаточных напряжений в условиях асимметрии цикла. Представлены диаграммы предельных амплитуд.

Ключевые слова: асимметрия цикла, остаточные напряжения, коэффициент концентрации.

Sochava A., Martovitsky L., Glushko V., Krimov E., Frolov R. It is influence of asymmetry cycle on the value effective concentration factor tensions

Samples of low-alloyed steel with stress concentration are investigated in asymmetrical cycles conditions. Mechanism of forming of residual stresses is described. Limit amplitude diagrams are presented.

Key words: asymmetrical cycles, residual stresses, stress concentration.