

УДК 620.178.3

Сочава А.І., к.т.н.; Мартовицький Л.М., к.т.н.; Глушко В.І., к.т.н.;
Фролов Р.О., магістр

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НА ОПІР ВТОМІ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ В УМОВАХ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ

Анотація. Проведені дослідження на опір втомі зразків з концентратором зі 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.

Аннотация. Проведены исследования на сопротивление усталости образцов с концентратором 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.

Abstract. 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.

Постанова проблеми.

В елементах машин, робота яких базується на переміщеннях, виникають динамічні навантаження з різними коефіцієнтами асиметрії циклу як при розтягуючих, так і стискаючих середніх напруженнях. Але довідникові джерела, в більшості своїй, надають дані про опір втомі конструкційних матеріалів для симетричного згину. Такий стан можна пояснити тим, що даний режим навантаження легко реалізується на простих за конструкцією машинах системи Шенка – згин з обертанням. Машини плаского згину і розтягання-стискання, на яких можна реалізувати асиметричні навантаження, зустрічаються не часто.

Рідкісними є також дані про витривалість конструкційних матеріалів при наявності концентраторів напружень, які мають місце у більшості деталей машин. Місця з концентраторами напружень називають небезпечними, оскільки вони найчастіше стають причинами відмови. Тому існує проблема про опір втомі деталей з

концентраторами напружень, дія яких в умовах асиметрії циклу є значною, оскільки концентратори являються джерелом залишкових напружень, величина яких залежить не тільки від геометрії концентратора, але і від величини і характеру зовнішніх навантажень. Асиметричний цикл збільшує ймовірність явища, коли місцеві напруження в зоні концентратора будуть перевищувати границю текучості. Така ситуація призводить до місцевої релаксації напружень, в результаті чого виникають залишкові напруження, здатні вплинути на довговічність деталі. При цьому в умовах асиметрії циклу даний ефект стає більш ймовірним.

Мета роботи.

На базі отриманих експериментальних результатів, теоретичних розробок кафедри «Деталі машин та ПТМ» ЗНТУ та існуючої наукової інформації в літературних джерелах пропонується до розглядання теоретичні основи механізмів формування напруженого стану зразків зі сталі 09Г2С з концентратором ($\sigma_T = 400 \text{ МПа}, \sigma_e = 500 \text{ МПа}$) при симетричних та асиметричних циклах навантаження.

Зміст дослідження.

Зразки виконані з листа в стані поставки товщиною 5 мм з центральним отвором діаметром 5 мм. За теоретичний коефіцієнт концентрації прийнято $\alpha_\sigma = 2,5$ [1].

Дослідження виконані на установці, створеній в Запорізькому національному технічному університеті [2], яка дозволяє здійснювати випробування зразків на розтягання-стискання при будь-якому коефіцієнті асиметрії циклу.

В даному дослідженні прийняті наступні режими випробувань:

- симетричний цикл,
- віднульове розтягання;
- віднульове стискання.

Симетричний цикл.

Механізм формування напруженого стану зразка в місці розташування концентратора представлено на рис.1.

Припустимо, що первинне навантаження здійснює півцикл (амплітуда) розтягання. В зразку виникає напруження, яке відповідає епюрі 1 (рис.1а). Місцеві напруження в зоні концентратора складають $\alpha_\sigma \cdot \sigma_a$, де σ_a - амплітуда напруження, визначеного для нетто-перетину. Якщо $\alpha_\sigma \cdot \sigma_a$ перевищує границю текучості сталі σ_T , то може здійснитися релаксація напружень і епюра прийме вид 2. При знятті навантаження в зразку виникнуть залишкові напруження відповідно епюрі 3 (рис.1б). При черговому навантаженні амплітудою стиску маємо в зоні концентратора епюру 4 (рис.1в), яка чисельно дорівнює епюрі 1 (рис.1а), 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 епюрі 5 створять залишкові напруження відповідно епюрі 6. В результаті складання епюрі 6 з черговим циклом розтягання, представленого епюрюю 7 (рис.1д), можна очікувати напруження, які відповідають епюрі 8. Остання є симетричною епюрі 5, розміщеною в зоні розтягання.

Таким чином, 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.

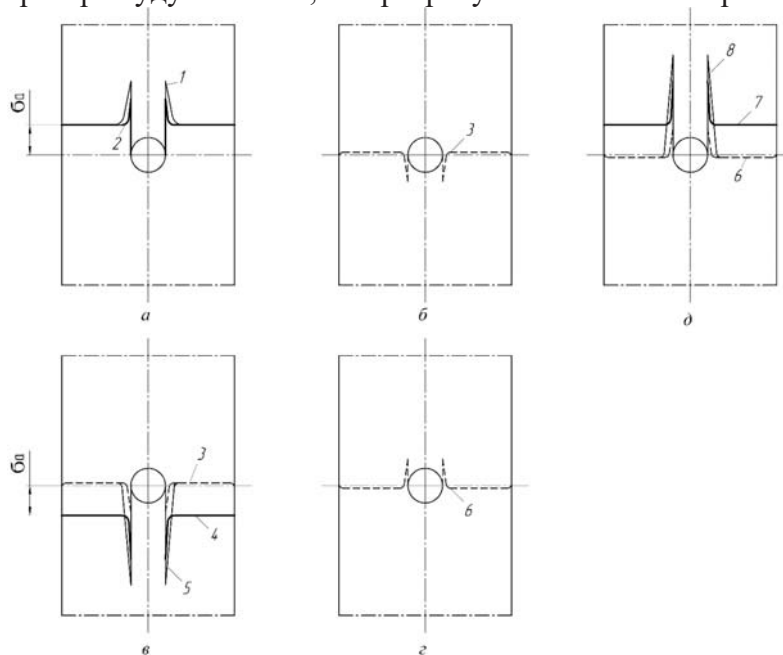


Рисунок 1 – Епюрі напружень при симетричному циклі

Віднульове розтягання. Для аналізу прийнято віднульове циклічне розтягання. У відповідності до конструкції випробувальної машини навантаження зразка здійснюється за формулою

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t, \quad (1)$$

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

σ_a - амплітуда циклу, МПа;

ω - кутова частота силозбуджуючої голівки, c^{-1} .

При випробуваннях з наявністю статичної складової, коли σ_{\max} перевищує границю текучості, може мати місце циклічна повзучість, яка в зоні концентратора сформує залишкові напруження у всьому перетині зразка.

Механізм формування залишкових напружень представлено на рис.2. При цьому прийнято режим, що відповідає довговічності 10^6 циклів при віднульовому розтяганні з напруженнями $\sigma_m = 90 \text{ МПа}$ та $\sigma_a = 90 \text{ МПа}$, які визначені за нетто-перетином. При теоретичному коефіцієнті концентрації $\sigma_\alpha = 2,5$ пік напруження в зоні концентратора сягає величини $\sigma_{\max} = 450 \text{ МПа}$, що приблизно на 50 МПа перевищує границю текучості (рис.2а).

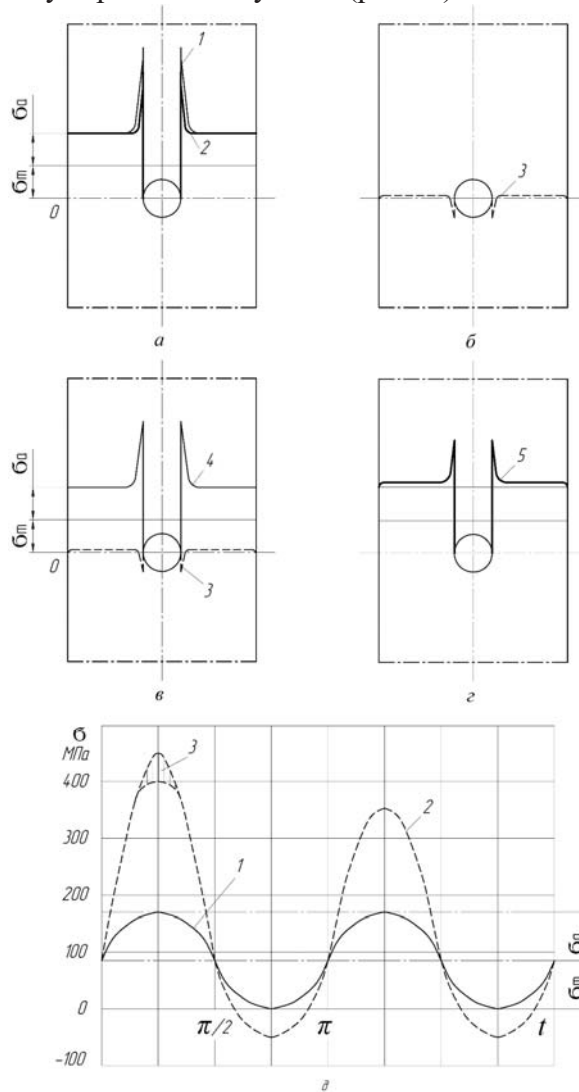


Рисунок 2 – Епюри напружень та графік навантаження зразка при $R = 0$

Припустимо, що в названій зоні здійснилася релаксація напружень на 50МПа (епюра 2). При знятті навантаження в зразку виникають залишкові напруження, які відповідають епюрі 3 (рис.2б). При повторному навантаженні в зоні концентратора будемо мати напруження, що відповідають значенню σ_T епюрі 4 (рис.2,в). В результаті підсумовування епюр 3 і 4 отримаємо епюру 5, пік якої зменшено на величину стискаючих напружень епюрі 3.

При подальших навантаженнях зона концентратора буде мати епюру 5 (рис.2г). В півциклі розвантаження в зразку в зоні концентратора будуть виникати стискаючі напруження епюрі 3, а розтягуючі напруження цієї епюрі будуть надто малі. Тобто, стискаючі залишкові напруження відіграють позитивну роль, знижуючі основні напруження розтягання.

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

Таким чином, релаксація напружень, яка відбувається лише при первинному навантаженні сприяє зниженню напруження в зоні концентратора і незначному підвищенню напружень в перетині. Через наявність стискаючої складової в зоні концентратора режим стає не чисто віднульовим розтягання.

Віднульове стискання. Як і у випадку віднульового розтягання, при віднульовому стисканні з перевищенням границі текучості σ_{Tc} може відбутися циклічна повзучість, яка також викличе появу залишкових напружень по всьому перетину зразка.

Механізм формування залишкових напружень представлено на рис.3. Для аналізу приймаємо віднульовий режим стиску, що відповідає довговічності 10^7 циклів з параметрами $\sigma_{m_c} = 140\text{МПа}$, $\sigma_a = 140\text{МПа}$.

При теоретичному коефіцієнті концентрації $\alpha_\sigma = 2,5$ максимальне напруження стискання в зоні концентрації дорівнює $|\sigma_{\max}| = (\sigma_{m_c} + \sigma_a) \cdot \alpha_\sigma = (140 + 140) \cdot 2,5 = 700\text{МПа}$. Таке напруження майже на 300МПа перевищує границю текучості, але менше границі міцності $\sigma_{a_c} = 835\text{МПа}$. При такому напруженні в зоні концентратора здійснюється релаксація напружень, циклічна повзучість, а також зміцнення завдяки наклепу і ефекту «кування». Все це породжує залишкові напруження, оскільки названі явища мають місцевий характер.

Первинне навантаження має відповідати епюрі 1 (рис.3а) ($\sigma_{\max_c} = 700\text{МПа}$). В результаті названих фізичних перетворювань в

зоні концентратора виникають напруження, що дорівнюють границі текучості σ_{Tc} (епюра 2, рис.3а). При знятті навантаження в зразку виникнуть залишкові напруження, які відповідають епюрі 3 (рис.3б). Прийmemo априорі, що залишкові напруження в зоні концентратора складають 50МПа , як і при від нульовому розтяганні. При повторному навантаженні попереднє напруження, що виникло після релаксації і дорівнює -400МПа , буде зменшене на величину залишкових напружень епюрі 3 (рис.3в). Після підсумування епюр 3 і 4 маємо напруження в зразку, які відповідають епюрі 5 (рис.3г).

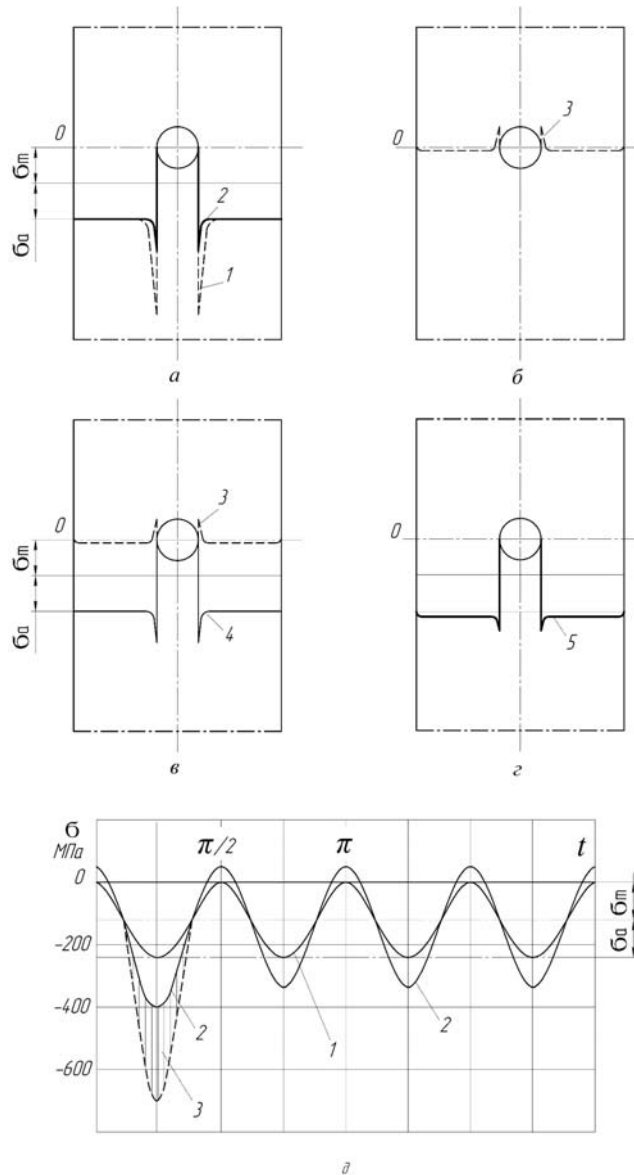


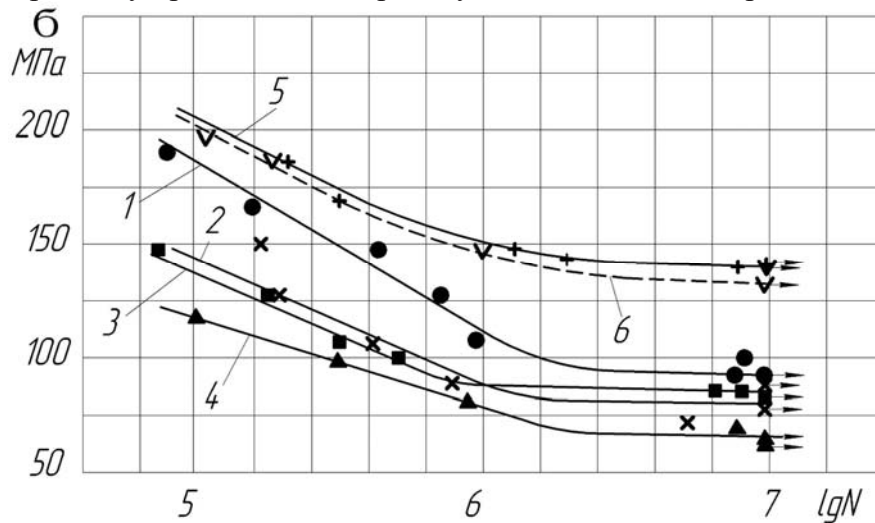
Рисунок 3 – Епюри напружень та графік навантаження зразка при $R = \infty$

Апріорний графік напружень зразка представлено на рис.3д; 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 будуть діяти напруження, що відповідають епюрі 3. Епюра 3 свідчить, що хоча зовнішнє навантаження не має розтягуючої складової, розтягуюча складова залишкових напружень буде сприяти виникненню і розвитку тріщини втоми.

На підставі приведених теоретичних розмірковувань напрошується висновок, що з точки зору виникнення і дії залишкових напружень даний конструкційний матеріал є більш чутливим до дії концентратора при симетричному циклі навантаження, оскільки залишкові напруження мають місце при кожному півциклі. Тобто, пошкодження від концентратора є більш дієвим при симетричному циклі, ніж коли матеріал працює в умовах асиметрії циклу.

Для підтвердження даної наукової концепції проведені випробування зразків при середніх напруженнях циклу, визначених за нетто-перетином: 0, +100, +200, +300, -100, -200 МПа. Результати експерименту представлені на рис.4 у вигляді сімейства кривих втоми.



1 – при $\sigma_m = 0$; 2 – 100 МПа; 3 – 200 МПа; 4 – 300 МПа; 5 – (-100 МПа); 6 – (-200 МПа)

Рисунок 4 – Криві втоми зразків з концентратором

Аналіз кривих свідчить, що перегин їх в горизонтальне положення здійснюється при накопиченні близько 2×10^6 циклів навантаження.

Взаємне розміщення кривих не викликає сумнівів. Криві при розтягуючих середніх напруженнях розміщуються під кривою втоми симетричного циклу, а криві втоми при стискаючих напруженнях σ_{m_c} розміщені вище.

Виникає питання щодо перетину кривих при середніх напруженнях розтягання 100 і 200 МПа при довговічності 10^6 циклів. Очевидно дане явище можна пояснити з точки зору механізму формування залишкових напружень в зоні концентратора (рис.4).

Відомо, що малі пластичні деформації розтягання знижують міцність металу, а значні, навпаки, зміцнюють. При $\sigma_m = 100 \text{ МПа}$ і амплітуді $\sigma_a = 80 \text{ МПа}$ зразки мають сумарне напруження $\sigma_{\max} = 180 \text{ МПа}$, яке в зоні концентратора при теоретичному коефіцієнті $\alpha_\sigma = 2,5$ може дати локальне напруження 450 МПа, що буде причиною невеликих пластичних деформацій.

По кривій втоми 3 (рис.4), що відповідає $\sigma_m = 200 \text{ МПа}$ і $\sigma_a = 80 \text{ МПа}$, максимальні напруження в зоні концентратора можуть досягти величини 700 МПа. Ці напруження можуть призвести до місцевого зміцнення матеріалу зразка, як за рахунок наклепу, так і завдяки релаксації. При цьому виникнуть стискаючі залишкові напруження, які дещо зменшать напруження розтягання та створять сприятливі умови для підвищення опору втоми матеріала зразка.

На рис.5 представлена діаграма граничних амплітуд зразків суцільних та з концентратором для довговічностей 10^6 і 10^7 циклів, де 1 – крива однакової довговічності суцільних зразків для $N = 10^6$ циклів; 2 – крива однакової довговічності суцільних зразків для $N = 10^7$ циклів; 3 – крива однакової довговічності зразків з концентратором для $N = 10^6$ циклів; 4 – крива однакової довговічності зразків з концентратором для $N = 10^7$ циклів. Криві суцільних зразків побудовані за даними роботи [3]. Криві зразків з концентратором є результатом даного дослідження, які побудовані за допомогою сімейства кривих втоми (рис.4).

На підставі даної діаграми граничних амплітуд можна оцінити значення ефективного коефіцієнта концентрації напружень k_σ і коефіцієнта чутливості до концентрації q_σ . Результати оцінки зведені до табл.1. В таблиці приведено:

σ_m - середнє напруження циклу, МПа;

σ_a - амплітудне напруження циклу, МПа;

k_σ - ефективний коефіцієнт концентрації;

q_σ - коефіцієнт чутливості до концентрації напружень.

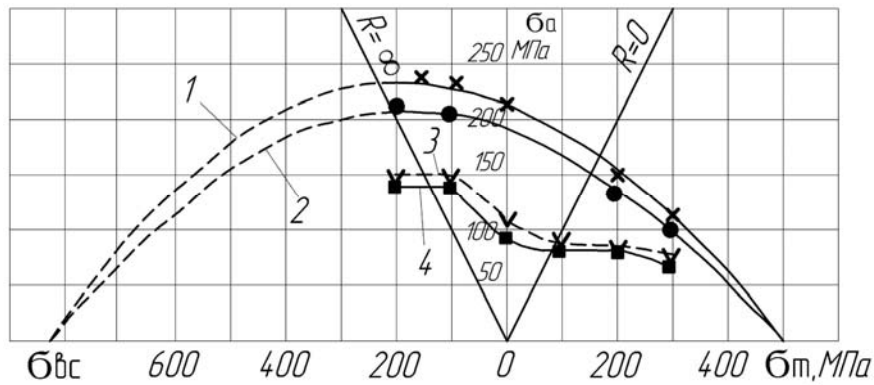


Рисунок 5 – Діаграма граничних амплітуд

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

Коефіцієнт чутливості до концентрації визначали за формулою $q_\sigma = (k_\sigma - 1)/(\alpha_\sigma - 1)$ [1].

Довідник [1] свідчить, що ефективний коефіцієнт концентрації не є залежним від середнього напруження циклу, а залежить тільки від амплітуди. Це припущення є сумнівним, що доводить таблиця 1. Чутливість зразків до концентрації найбільша при симетричному циклі і при $\sigma_m = 100 \text{ МПа}$, коли ймовірність виникнення залишкових напружень мала. При збільшенні середнього напруження розтягання та при стискаючих напруженнях σ_{mc} чутливість до концентрації значно зменшується. Тобто, ефективний коефіцієнт концентрації залежить від величини середнього напруження циклу. При збільшенні величини середніх напружень циклу ефективний коефіцієнт концентрації зменшується.

Оскільки розрахунок деталей машин та металоконструкцій ПТМ здійснюють за подібними циклами, то доцільно розглядати значення ефективного коефіцієнта концентрації в залежності від коефіцієнта асиметрії циклу. Цей висновок слід враховувати при розрахунку елементів кранових металоконструкцій на опір втомі. При такому підході враховується вплив на ефективний коефіцієнт

концентрації k_{σ_r} величини середнього напруження і амплітуди циклу. Даний аналіз графічно представлено на рис.6 для різних значень коефіцієнтів асиметрії R , показаних у вигляді променів, проведених під кутом γ , для якого $tg\gamma = 1 - R/1 + R$. На рис.6 зображені криві 1 – гладких зразків для $N = 10^6$ циклів; 2 – гладких зразків для $N = 10^7$ циклів; 3 – зразків з концентратором для $N = 10^6$ циклів; 4 – зразків з концентратором для $N = 10^7$ циклів.

Дані для побудови кривих однакової довговічності гладких зразків взято з роботи [3]. Для апроксимації кривих використана формула [4]

$$\sigma_a^{(N)} = \sigma_{-1}^{(N)} \cdot \left(\frac{Lg Lg N}{Lg Lg N_B} \right)^{\frac{2\sigma_m}{\sigma_\sigma - \sigma_{\sigma_c}}} \cdot \frac{(\sigma_m - \sigma_\sigma)(\sigma_m - \sigma_{\sigma_c})}{\sigma_\sigma \sigma_{\sigma_c}}; \quad (3)$$

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_σ - границя міцності при розтяганні, МПа;

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

Криві однакової довговічності зразків з концентратором побудовані також за даними сімейства кривих втоми (рис.4).

Промені діаграми (рис.6) описуються формулою

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

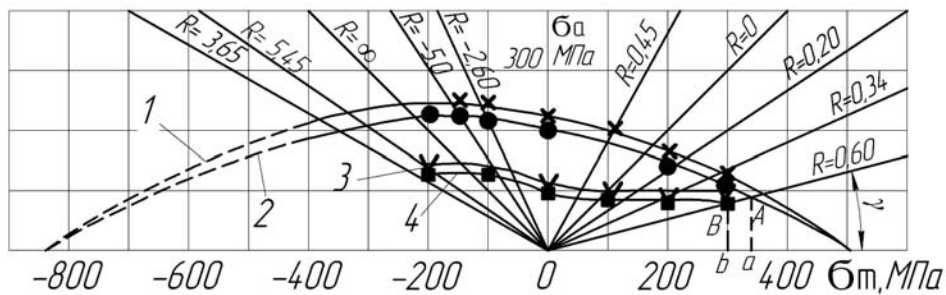


Рисунок 6 – Діаграма для визначення залежності ефективного коефіцієнта концентрації напружень від асиметрії циклу

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

Як приклад, розглянемо визначення ефективного коефіцієнта концентрації напружень в залежності від коефіцієнта асиметрії циклу $R = 0,60$ при довговічності $N = 10^7$ циклів (рис.6). Позначимо на діаграмі точки A і B перетину променя $R = 0,60$ з кривими однакових довговічностей гладких зразків і зразків з концентратором. Опустимо перпендикуляри Aa і Bb . Тоді ефективний коефіцієнт концентрації 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 для відповідних коефіцієнтів асиметрії циклу k_{σ_R} зведені в табл.2. Результати свідчать, що найбільші значення k_{σ_R} мають місце при симетричному навантаженні і невеликій асиметрії (для $R = -0,45$ і $R = -2,6$). При збільшенні асиметрії циклу значення k_{σ_R} зменшуються завдяки впливу залишкових напружень в зоні концентратора.

Аналогічний висновок можна зробити і відносно результатів експериментів, представлених в табл.1.

Висновки.

Результати експериментальних досліджень та теоретичні основи механізму формування напруженого стану в 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 вантажопідійомних кранів та інших виробів.

ЛІТЕРАТУРА

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. Сочава А.І. Дослідження низьколегованих сталей на опір втомі в умовах асиметрії циклу / Сочава А.І., Глушко В.І., Мартовицький Л.М., Курлаєва 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.