

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу А.Д.Погребняка «Експериментальне дослідження та розробка методів прогнозування довговічності конструкційних матеріалів внаслідок втоми за умов комбінованого статичного та циклічного навантаження», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного тіла

Визначення достовірного коефіцієнту запасу по навантаженнях та по ресурсу за умов багатоциклової втоми для відповідальних елементів конструкцій різного призначення є одним із обов'язкових експериментально-теоретичних розрахунків на стадії їх конструювання. Багатоциклова втома матеріалів та елементів конструкцій характеризується багатьма параметрами. Розрахунки проводяться в детермінованій та ймовірнісній постановках.

В детермінованій постановці основною задачею є визначення границі втоми та, відповідно, коефіцієнта запасу по напруженнях елемента конструкції з врахуванням основних технологічних та конструктивних його параметрів. Ця складна та комплексна задача вимагає визначення впливів режимів експлуатаційного термосилового навантаження, якості технологічної обробки, габаритно-вагових показників та виду самого матеріалу. На цій основі вибирається та обґрунтовується узагальнена модель граничного стану та відповідний критерій руйнування. Саме вирішенню названої проблеми і присвячена дисертація А.Д.Погребняка. Актуальність наукової теми не викликає сумнівів. На сьогодні поки не розроблено та не обґрунтовано достовірних і узагальнених критеріїв руйнування елементів конструкцій по параметру багатоциклової втоми з врахуванням асиметрії навантаження, виду напруженого стану та концентрації напружень.

Автором, на основі багаторічної роботи, проведено цілий комплекс експериментально-теоретичних досліджень сучасних жаростійких та жароміцних сталей і сплавів для нагальних потреб авіакосмічного комплексу України. Обґрунтованість основних наукових результатів забезпечувалась коректністю постановки задач, використанням сучасних методик та обладнання для експериментальних досліджень, використанням відповідних методів математичної статистики при обробці результатів та ефективних ітераційних

методів при визначенні параметрів моделей та критеріїв граничного стану. Проведено порівняння основних розрахункових результатів визначення граничного стану за умов багатоциклової втоми з відповідними експериментами. Встановлені границі використання розроблених автором моделей та критеріїв руйнування. Всі наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертації, мають достатній рівень обґрунтованості. Весь комплекс експериментальних результатів виконаний на сучасному обладнанні, з використанням запатентованих методик та впроваджений в наукоємний та високотехнологічний сегмент машинобудівного комплексу України, зокрема в ДП «КБ «Південне» ім. М.К.Янгеля». Тема дисертаційної роботи сформульована на основі результатів виконання автором цілого ряду науково-дослідних робіт, починаючи з 1974 року, в рамках державних наукових програм та планів Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України.

Наукова новизна роботи полягає в розробці та обґрунтуванні ефективного узагальненого методу прогнозування довговічності металічних матеріалів по параметру багатоциклової втоми. Він ґрунтується на феноменологічних моделях та критеріях граничного стану на стадії макроруйнування в нормованій системі координат з використанням концепції еквівалентних напружень. Базовими є експериментальні дослідження зразків конструкційного матеріалу на статику та втому. Розроблені моделі враховують вид напруженого стану та асиметрію циклу втомного програмного навантаження. Границі використання їх обґрунтовано на широкому спектрі сучасних жаростійких та жароміцних сталей і сплавів в робочому діапазоні температур.

Практична цінність наукових результатів, отриманих автором, включає комплекс випробувань сучасних та перспективних металічних конструктивних матеріалів в зоні робочих температур для потреб авіакосмічного комплексу. Важливе значення в практичному використанні також мають рекомендації автора щодо розрахунку характеристик втоми у вигляді інваріантних до виду напруженого стану та асиметрії циклу діаграм граничного стану. Це дозволяє

суттєво зменшити кількість експериментальних досліджень на стадії проектування виробів нової техніки.

Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 294 сторінки та включає 97 рисунків, 28 таблиць та 201 найменувань літературних джерел.

В першому розділі проведено критичний аналіз проблеми багатоциклової втоми в процесі конструювання виробів нової техніки. Показано вплив асиметрії циклу та виду напруженого стану на границю втоми конструкційних матеріалів. Обґрунтована проблема розробки узагальнюючого методу прогнозування втомної довговічності металевих конструкційних матеріалів з врахуванням виду напруженого стану та асиметрії циклу. Сформульовано комплекс задач, які розв'язуються в наступних розділах роботи.

Другий розділ дисертації присвячений детальному опису експериментальних методик та модернізованого автором обладнання, яке використовувалось для випробування конструкційних матеріалів в широкому діапазоні підвищених температур. Оригінальні вузли стендів та методики захищені 9 патентами на винаходи. Наведена також методика статистичної обробки експериментальних даних.

В третьому розділі роботи описані результати комплексу експериментальних досліджень сталей і сплавів, які направлені на виявлення рівня впливу температури, асиметрії циклу напружень та виду напруженого стану на їх характеристики втомної міцності. Побудовані нормовані діаграми граничних напружень та показана ймовірність інваріантності існування таких діаграм в нормованій системі координат по відношенню до матеріалу та асиметрії циклу втомного навантаження.

Четвертий розділ роботи присвячено розробці та обґрунтуванню меж використання методу прогнозування довговічності конструкційних металічних матеріалів у вигляді феноменологічних моделей втомної міцності. Враховується асиметрія циклу та вид напруженого стану. В якості моделей граничного стану вибрані функції у вигляді лінійної, параболічної, епілептичної

та тригонометричної функції. Критерієм виступило максимальне узгодження з експериментально отриманими діаграмами граничних напружень в нормованій системі координат. В роботі обґрунтовано використання степеневих тригонометричних функцій в якості феноменологічних моделей граничного стану для крихких та вязких станів конструкційного матеріалу. В розділі, використовуючи концепцію еквівалентних напружень, отримані залежності для визначення довговічності конструкційних матеріалів за умов симетричного та асиметричного циклів з врахуванням виду напруженого стану. Описані базові експерименти для визначення параметрів моделей граничного стану.

В п'ятому розділі дисертації показано методику розрахунку довговічності та граничного стану конструкційних матеріалів за умов втомного навантаження та видів руйнування (для пластичних і крихких матеріалів). При цьому розглядаються всі види втомного деформування, які характерні для елементів конструкцій (розтяг-стиск, згин, кручення) з врахуванням асиметрії циклу. Побудовані відповідні діаграми граничних напружень.

Шостий розділ роботи присвячений, в основному, експериментально-теоретичному розрахунку довговічності та граничного стану ряду металевих конструкційних матеріалів за умов двовісного статистичного та втомного навантаження з врахуванням асиметрії циклу. Результати розрахунків довговічності для ряду конструкційних матеріалів наведено у вигляді кривих втоми. Встановлена максимальна похибка між результатами розрахунків та експериментальними даними по напруженнях в розмірі 20%.

Дисертаційна робота А.Д.Погребняка, згідно змісту, написана зрозумілою мовою з використанням сучасної термінології, яка прийнята в механіці твердого деформівного тіла. Всі результати досліджень повно і глибоко проаналізовані в тексті роботи.

Основні результати роботи та висновки повністю підтверджуються широким спектром експериментальних досліджень автора. Вони достатньо повно викладені в опублікованих наукових працях А.Д.Погребняка. Дисертаційна робота та автореферат оформлені без суттєвих зауважень.

В той же час аналіз змісту дисертаційної роботи, публікацій автора та автореферату дає можливість зробити наступні зауваження та побажання:

1. Назву дисертаційної роботи вважаю занадто довгою. Її можна було б значно скоротити, наприклад: «Методи прогнозування втомної довговічності конструкційних матеріалів за умов програмного навантаження».
2. Прийнято, що, умовно, конструкційний матеріал приймається пластичним, якщо гранична залишкова деформація  $\delta \geq 5\%$  та крихким, якщо  $\delta < 5\%$ . В той же час існує поняття: крихкий, вязкий та вязкокрихкий тип руйнування. Тип руйнування та сама назва конструкційного матеріалу по параметру  $\delta$  залежить від багатьох факторів (виду напруженого часу, температури, тривалості навантаження, швидкості навантаження та інш.). Тому більш правильно потрібно говорити про стан матеріалу. В той же час автор (стор. 18 автореферату та стор. 156, 157 дисертації) вводить свою класифікацію у вигляді граничної пластичності на рівні границі міцності  $\varepsilon_B$ . Для «вязких» матеріалів приймається  $\varepsilon_B > 15\%$ , для «крихких» –  $\varepsilon_B \leq 15\%$ . Виникає питання доцільності такої класифікації.
3. Відомо, що при високочастотному втомному навантаженні виникає саморозігрів зразків. В дисертації (стор. 65÷71) не достатньо детально описана корекція температурного режиму нагрівальних елементів, яка могла б враховувати це фізичне явище.
4. В роботі (стор. 134÷139) описуються особливості процесів повзучості при асиметричному циклічному навантаженні. В той же час автором не конкретизована величина асиметрії циклу  $R_\sigma$ , яка виступає пороговим значенням для врахування компоненти повзучості в загальній деформації до руйнування. Для умов малоциклової втоми такий поріг орієнтовно складає  $R_\sigma \geq -0,5$ .
5. В пункті 3 основних результатів роботи та висновках «... обґрунтовано гіпотезу існування єдиних діаграм граничного стану в нормованій системі координат ...» виникає питання про однорідність напружень в

перерізах зразків на розтяг, згин, кручення та їх комбінаціях. Це питання в дисертації та авторефераті не конкретизується і не аналізується.

6. Значний вплив на втомну міцність відіграють такі фактори, як чистота обробки поверхні деталі та її геометричні розміри. Автором в роботі ці важливі фактори, на жаль, не розглядалися.
7. Автором дисертаційної роботи використовується традиційний (класичний) підхід до оцінки багатоциклової втоми, а саме: розтяг-стиск, кручення, згин та їх комбінації. При цьому визначаються відповідно нормальні та дотичні максимальні напруження для кожного виду випробувань. В той же час можна було б, на мій погляд, використати поняття інваріантів (наприклад – інтенсивність напружень, яка зв'язана з другим інваріантом девіатора напружень). Тоді можна було б весь комплекс експериментальних досліджень звести до єдиного виміру та відповідного нормування.

В той же час, не зважаючи на зауваження та виходячи з викладеного і враховуючи актуальність, складність та багатогранність наукової проблеми багатоциклової втоми, сутність наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів, а також відповідність наукової роботи вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567, вважаю, що за розробку ефективного узагальненого методу прогнозування втомної довговічності конструкційних матеріалів А.Д.Погребняк гідний присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент

член-кореспондент НАН України,

д.т.н., проф.



М.І.Бобир