

**М. А. Зенкін**, д.т.н., професор  
**Н. Л. Козелло**, к.т.н., доцент  
**І. Ю. Василенко**, аспірант  
**О. О. Слітюк**, к.т.н., доцент

## ОЦІНКА ЯКОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ СПІЛЬНІЙ ДІЇ НОРМАЛЬНИХ ТА ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

E-mail: milanium@i.ua

*При проведенні досліджень міцності клейових з'єднань було використано установку для випробування на міцність клейових з'єднань при спільній дії нормальних та дотичних напружень. Відмінною особливістю установки є те, що вона дозволяє за рахунок реалізації схеми навантаження забезпечувати різні співвідношення нормальних та дотичних напружень при їх рівномірному розподіленні по площині склеювання.*

*Ключові слова: клейові з'єднання, міцність, напружено-деформований стан, оцінка якості клейових з'єднань, контроль, склеювання.*

### Вступ

Склеювання – один з універсальних способів отримання нероз'ємних з'єднань, який має ряд переваг по порівнянню з іншими методами складання (зварювання, пайка, клепка та ін.). Широкому розповсюдженню клейових з'єднань в машинобудуванні сприяють успіхи в галузі створення нових клеїв та розробка більш сучасних технологій склеювання. Однак використання клейових з'єднань в машинобудуванні вимагає серйозних розробок як по технології склеювання, так і по визначенню експлуатаційних характеристик складаємих деталей. Оцінка якості клейових з'єднань в цілому ряду випадків здійснюється за міцністними характеристикам. Особливо важливо отримати значення міцності для реальних умов, в яких працюють клейові з'єднання. Практично в будь-якій конструкції клейове з'єднання підлягає спільній дії нормальних та дотичних напружень. Однак більшість експериментальних методів і, що особливо важливо, апаратне забезпечення випробування на міцність клейових з'єднань, оснований на використанні даних тільки при відриві, або тільки при зсуві. Тому актуальним є питання дослідження клейового з'єднання при спільній дію нормальних та дотичних напружень в площині з можливістю регулювання їх співвідношення. Дослідження міцності клейових з'єднань за складного напруженого стану є порівняно новим напрямком у проблемі підвищення експлуатаційної надійності нероз'ємних з'єднань, розвиток якого обумовлений запитами нової техніки та науки про міцність твердого тіла. Проведений аналіз сучасної наукової та технічної вітчизняної та зарубіжної літератури дозволяє стверджувати, що міцність клейового з'єднання є основним фактором, який визначає його працездатність, незалежно від галузі використання. Особливо важливо одержати значення міцності для реальних умов, в яких працюють клейові з'єднання. Тому виникає необхідність у випробуваннях міцності клейових з'єднань при сумісній дії нормальних та дотичних напружень.

### Постановка завдання

На сьогоднішній день відсутні систематичні дані про опір клейових з'єднань при сумісній дії нормальних та дотичних напружень, не дивлячись на те, що подібні дослідження не є рідкісними. Пояснюється це тим, що використовується недостатньо вдосконалені методики дослідження, що суттєво зменшують співвідношення отриманих результатів. Часто положення ускладнюється неоднорідністю розподілення напружень по площині склеювання, що ускладнює констатацію особливостей руйнування. Аналіз існуючих методів дослідження міцності клейових з'єднань при сумісній дії нормальних та дотичних напружень дозволяє стверджувати, що найбільш раціональним є навантаження за допомогою тільки однієї сили. З урахуванням цього на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки Київського національного університету технологій та дизайну спільно з Інститутом проблем міцності НАН України були проведені дослідження міцності клейових з'єднань. При проведенні досліджень було використано установку для випробування на міцність клейових з'єднань при спільній дії нормальних та дотичних напружень [1, 2].

Специфіка клейових з'єднань полягає в залежності міцності від часу полімеризації клейової композиції. Причому ця залежність для різних клейових композицій проявляється по різному. Але кінетика зміни міцності не завжди враховується в дослідницькій та інженерній практиці, що приводить до ускладнення в порівнянні результатів випробувань та помилок в розрахунках міцності клейових з'єднань. Тому випробування закономірностей зміни міцності клейових з'єднань з часом є необхідною умовою вибору клейових композицій і забезпечення робото спроможності клейових з'єднань.

### Результати та їх обговорення

Дослідження міцності клейових з'єднань за складного напруженого стану проводилось при сумісній дії нормальних і дотичних напруг, співвідношення яких було обрано 0,3; 0,5; 1; 1,7; 3,6, згідно графіка схеми навантаження. Для порівняльної оцінки міцності клейових з'єднань проводились випробування міцності при нормальному відриві (при  $\tau = 0$ ) та зсуві (при  $\sigma = 0$ ) на рівномірне відривання.

Дослідження було проведено з використанням установки яку і було покладено в основу створення методики визначення міцності клейових з'єднань, в умовах найбільш наближених до експлуатації (рис. 1).



Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження міцності клейових з'єднань при спільній дії нормальних та дотичних напружень

Відмінною особливістю установки є те, що вона дозволяє за рахунок реалізації нової схеми навантаження забезпечувати різні співвідношення нормальних та дотичних напружень при їх рівномірному розподіленні по площині склеювання.

Розглянемо схему навантаження клейового з'єднання при дослідженні міцності клейових з'єднань при спільній дії нормальних та дотичних напружень (рис. 2). Рівномірне розподілення нормальних напруг може бути досягнуто за рахунок того, що згинаючий момент в площині клейового шва з склеєних зразків 1, 2 буде дорівнювати нулю. Цю рівність можливо встановити, введенням допоміжної сили, яка буде діяти паралельно і ексцентрично осі балки. Роликовий упор 5 встановлено на рамі 4 таким чином, що в ньому під дією навантаження  $P$  виникає реактивна сила  $R$ , що діє паралельно і ексцентрично осі балки.

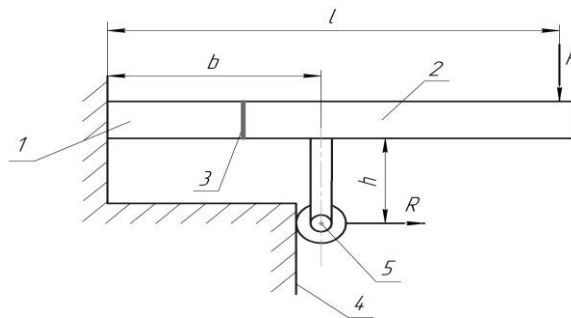


Рис. 2. Схема навантаження клейового з'єднання при дослідженні міцності клейових з'єднань при спільній дії нормальних та дотичних напружень

Рівність нулю згинаючого моменту в площині клейового слою, віддаленого від закріплення консолі на відстань  $Z_0$ , може бути представлена у вигляді (1):

$$M_{Z_0} = P(l - Z_0) - Rh = 0, \quad (1)$$

де:  $P$  – навантаження;

$l$  – відстань до точки прикладання сили  $P$ ;

$h$  – відстань від горизонтально розташованих зразків до точки виникнення реактивної сили;

$Z_0$  – відстань від клейового слою до закріплення консолі.

Визначаємо значення  $R$  – реактивної сили.

Запишемо канонічне рівняння метода сил (2):

$$\delta_{11}\bar{X} + \Delta_{1P}, \quad \bar{X} = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}}. \quad (2)$$

Знайдемо значення коефіцієнтів  $\delta_{11}$  і  $\Delta_{1P}$ :

$$\Delta_{1P} = -\frac{h}{E_2 I_2} \left[ P(l-b)b + \frac{Pb^2}{2} \right] = -\frac{Phb(2l-b)}{E_2 I_2}; \quad (3)$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{E_4 I_4} \frac{1}{2} h \frac{2}{3} h + \frac{1}{E_2 I_2} h b h = \frac{h^2}{E_2 I_2} \left( \frac{E_2 I_2}{3E_4 I_4} h + b \right); \quad (4)$$

$$\bar{X}_1 = \frac{Phb(2l-b)E_2 I_2}{2E_2 I_2 h^2 \left( \frac{E_2 I_2}{3E_4 I_4} h + b \right)}; \quad (5)$$

Підставимо значення  $R$  (5) в рівняння (1):

$$M_{z_0} = P(l-z_0) - \frac{P(2l-b)}{2 \left( \frac{E_2 I_2}{3E_4 I_4} h + b \right)} = 0, \quad (6)$$

де  $E_2 I_2$  – згинаюча жорсткість зразка;

$E_4 I_4$  – згинаюча жорсткість роликового упора;

$b$  – відстань до точки виникнення реактивної сили.

Співвідношення згинаючих жорсткостей зразка і роликового упору підбирається таким чином, щоб:

$$b + \frac{E_2 I_2}{3E_4 I_4} h \approx b. \quad (7)$$

тоді 
$$M_{z_0} = P(l-z_0) + \frac{P(2l-b)}{2} = 0, \quad (8)$$

тоді 
$$Z_0 \approx \frac{b}{2}.$$

Ми отримали, що згинаючий момент в клейовому шву дорівнює нулю. При навантаженні зразка силою  $P$  на клейовий шов діє тільки дві сили – осьова  $N$  і поперечна  $Q$ , які можна розрахувати згідно формул:

$$N = \frac{2l-b}{2n} P; \quad (9)$$

$$Q = P.$$

Під дією цих сил в плоскості клейового шва виникають нормальні та дотичні напруження:

$$\sigma = \frac{2l-b}{2h} \cdot \frac{P}{F}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{P}{F}.$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу зразка на відстані  $Z_0$  від закріплення консолі.

Співвідношення між нормальними та дотичними напруженнями в клейовому шарі має такий вигляд:

$$\sigma = \frac{2l-b}{2h} \cdot \tau. \quad (11)$$

Отже проведені розрахунки дозволяють стверджувати, що при навантаженні склеєного зразка силою  $P$ , згинаючий момент в клейовому шву дорівнює нулю, тобто на клейовий шов діє тільки дві сили – осьова  $N$  і поперечна  $Q$ , а в плоскості клейового шва виникають нормальні  $\sigma$  та дотичні  $\tau$  напруження. Величина нормальних напружень залежить від величини навантаження і відстані від точки

її прикладання до закріплення консолі, а дотичних напруг – тільки від навантаження.

Для випробувань застосовують зразки за конструкцією аналогічний зразкам, які застосовують для випробувань клейових з'єднань при рівномірному відриві. Проте зразки видозмінюють в зв'язку зі специфікою конструкції установки, тому довжина зразка становить 60 мм. Діаметри половин зразка що склеюються, не повинні відрізнятись один від одного більше ніж на 0,1 мм. Взаємне зміщення двох половин склеєного зразка не повинно перевищувати 0,5 мм. Поверхні, що склеюються, повинні бути плоскими та перпендикулярні повздовжній осі зразка, а опорні поверхні головок зразків повинні бути паралельними до поверхонь, що склеюються. Клейові потоки на торцях шва повинні бути зачищені до випробування. При проведенні досліджень зразків, поверхні що склеюються, підлягали дробострумінній обробці і знежирюванню водяними миючими розчинами або органічними розчинниками. Час між зачищенням поверхні й склеюванням не повинен перевищувати 6 годин. Після зачищення проводилось знежирення поверхні. Шорсткість сполучних поверхонь зразків становила  $Ra = 10$  мкм. Зразки виготовленні з матеріалу сталь 40 та з алюмінієвого сплаву, по своїй конструкції відповідали вимогам розробленої методики. Вимірювання проводилися при температурі  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

Для проведення досліджень було обрано два клеї УП5-207 та УП5233-1 [3, 4]. Клей наносився на обидві поверхні, що склеюються. При нанесенні клею варто контролювати рівномірність покриття клеєм всієї поверхні, відсутність непроклеїв (ділянок не змазаних клеєм). Зразки, що склеюються з'єднують і розміщують в пресі (зажимі), який забезпечує тиск для склеювання. Для клейової композиції гарячого затвердіння УП5-207, прес зі склеєними елементами поміщають у термошафу для полімеризації. Процес полімеризації проводили при  $T = (180 \pm 5) ^\circ\text{C}$  і витримували при цій температурі протягом 2 год., з моменту досягнення склеєними деталями зазначеної температури. Температуру контролюють термopарою або термометром, поміщеним поблизу клейового шару. По закінченні витримки при зазначеній температурі склеєні деталі охолоджують не виймаючи з термошафи при незначно відкритих дверцятах до досягнення кімнатної температури. Робочі навантаження на виріб проводили після 12 год. витримки при кімнатній температурі. Для двокомпонентної клейової композиції УП5233-1 холодного затвердіння композицію готують згідно інструкції. Процес полімеризації проводили при кімнатній температурі.

При експериментальних дослідженнях були отримані залежності зміни міцності клейового шва від часу його полімеризації і встановлено підвищення початкової короткочасної міцності після малих за часом витримок, а потім у міру збільшення часу витримки – стабілізація короткочасної міцності.

Результати експериментальних досліджень залежності міцності клейових з'єднань після 4, 5...24 діб після склеювання представлені на в вигляді поверхонь напруг, представлених в координатах – нормальні напруження  $\tau$  МПа – дотичні напруження  $\sigma$  МПа – час полімеризації клейової композиції  $t$  діб (рис. 3а, рис. 3б). Похилі площини, які проходять через вісь часу, відповідають розподілам нормальних і дотичних напруг, співвідношення яких було обрано 0,3; 0,5; 1; 1,7; 3,6. Поверхня на рис. 3 а характеризує залежність міцності клейового з'єднання від часу полімеризації однокомпонентної клейової композиції гарячого затвердіння УП5-207, а поверхня на рис. 3 б від часу полімеризації двокомпонентної клейової композиції холодного затвердіння УП5233-1.

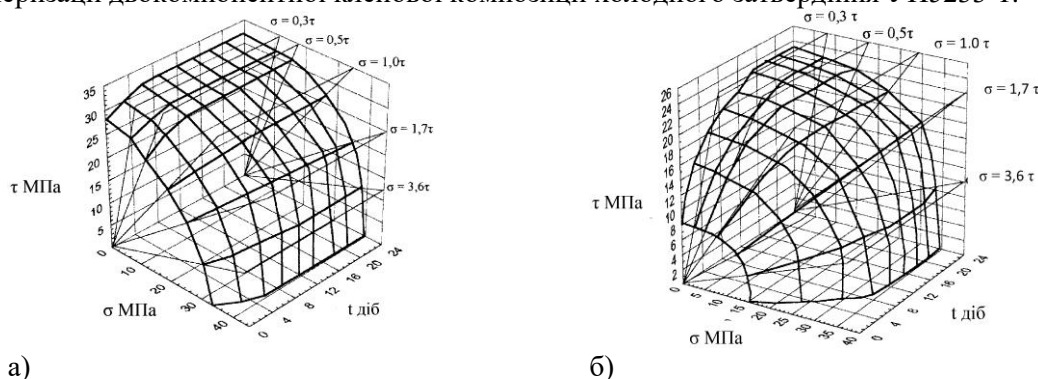


Рис. 3. Залежність міцності клейових з'єднань при різних співвідношеннях нормальних ( $\sigma$ ) та дотичних ( $\tau$ ) напружень від часу полімеризації:

а) клейової композиції УП5-207; б) клейової композиції УП5233-1

Одержані в результаті випробувань залежності дозволяють стверджувати, що міцність клейової композиції УП5-207 значно вище міцності клейової композиції УП5233-1, що пояснюється складом клею та режимами полімеризації. За даними кривими також досить чітко виявляється підвищення початкової короткочасної міцності, але інтенсивність і тривалість цього підвищення для клейових

композицій УП5-207 та УП5233-1 різні. Збільшення міцності з'єднань на основі двокомпонентної клейової композиції УП5233-1 холодного затвердіння проходить повільно, протягом 16 днів, а на основі клейової композиції гарячого затвердіння УП5207 – 3 дні, а потім у міру збільшення часу витримки проходить стабілізація короткочасної міцності.

Для одержання графіків залежності міцності клейових з'єднань при різних співвідношеннях нормальних та дотичних напружень також були враховані стандартні випробування міцності при нормальному відриві (при  $\tau = 0$ ) та зсуві (при  $\sigma = 0$ ). Конструкція пристрою, схема навантаження і тип зразків не дозволяють отримати точку на осі ординат, найближча точка отримана при співвідношенні  $\sigma = 0,3 \cdot \tau$ . В областях, які обмежені осями координат і кривими міцності, короткочасна статична міцність забезпечується при будь-якій відповідності нормальних та дотичних напруг. Оцінка міцності клейового з'єднання по результатам тільки роздільних випробувань міцності при нормальному відриві (при  $\tau = 0$ ) та зсуві (при  $\sigma = 0$ ) може привести до значних помилок.

Звертає на себе увагу, перш за все у всіх розглянутих випадках досить близький характер кривих граничного стану. Можна вважати, що характер кривих близький до еліптичного, що є характерним як для однорідних полімерів, так і для багатьох металів.

Оскільки характер граничних кривих відображає особливості руйнування, то можна припустити, що вони є в якій то мірі є загальними для даного з'єднання за даних умов випробування і інших однорідних матеріалів. Таким чином загальні якісні особливості зміни міцності клейового з'єднання елементів дозволяють в якій-то мірі також стверджувати, що ці особливості визначаються в основному властивостями клею [5, 6].

Таким чином, дані композиції можна використовувати і одержувати якісні з'єднання тільки після повної полімеризації, але час полімеризації для різних клейових композицій різний і може відрізнитися від характеристик клею. Результати експериментальних досліджень дають підставу стверджувати, що використання клею УП5-207 та УП5233-1 у поєднанні з оптимальним режимом формування клейових з'єднань дозволяє забезпечити достатню їхню надійність в експлуатації.

Проведення експериментальних досліджень і промислове апробування різних по призначенню клеєскладених з'єднань показало не тільки можливість, але і доцільність їхнього широкого використання. Широке застосування ефективних методів контролю, дає можливість вчасно коректувати технологічний процес, робити переналадження устаткування, зберігати оптимальні режими виготовлення з погляду виробничого розкиду характеристик механічних властивостей.

#### **Висновки**

Розроблена методика по визначенню міцності клейових з'єднань при сумісній дії нормальних та дотичних напружень, яка дозволяє забезпечувати різні співвідношення нормальних та дотичних напружень при їх рівномірному розподіленні по площині склеювання.

Проведено експериментальну оцінку та аналіз характеристик міцності клейових з'єднань за складного напруженого стану. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень одержана принципіальна можливість оцінки міцності клейових з'єднань, працюючих в реальних умовах експлуатації.

#### **Список літературних джерел**

1. Зенкін А. С. Створення конструкції пристрою для випробування на міцність клейових з'єднань при спільній дії нормальних та дотичних напружень / А. С. Зенкін, Н. Л. Козелло, К. М. Бичкова. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2003. – № 2. – С. 51-55.
2. Бичкова К. М. Розробка рекомендацій щодо вдосконалення нормативної документації з оцінки міцності клейових з'єднань у машинобудуванні / К. М. Бичкова, Н. Л. Козелло, В. О. Годік. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2006. – № 3. – С. 53-59.
3. Василенко І. Ю. Математична модель контролю складання клейових з'єднань / І. Ю. Василенко, А. С. Зенкін. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 1 (82). – С. 125-130.
4. Василенко І. Ю. Оцінка якості клейових циліндричних з'єднань з урахуванням впливу мікропрофілю поверхонь деталей / І. Ю. Василенко, А. С. Зенкін. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 2 (84). – С. 193-199.
5. Фрейдин А. С. Прочность и долговечность клеевых соединений / А. С. Фрейдин. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
6. Бурмистров В. П. Обеспечение качества неразъемных соединений и полуфабрикатов / В. П. Бурмистров. – Л.: Машиностроение, 1985. – 223 с.