

# ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРИПРАЦЮВАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ СИСТЕМ

**М. В. Кіндрачук**

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри\*

E-mail: nau12@ukr.net

**Ю. Л. Хлевна**

Аспірант\*

E-mail: yuliya-khlevna@yandex.ru

**Е. А. Кульгавий**

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник\*

E-mail: nau12@ukr.net

**О. І. Духота**

Кандидат технічних наук, доцент,  
старший науковий співробітник

Кафедра технологій відновлення авіаційної техніки\*\*

E-mail: nau12@ukr.net

\*Кафедра машинознавства

\*\*Національний авіаційний університет  
пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

*В роботі наведено результати дослідження зовнішньосилового впливу на процес формування трибологічних структур етапу припрацювання системи «БрАЖМц10-3-1,5-АМГ-10-30ХГСА». Показано, що ступінчасте збільшення навантаження та постійна швидкість ковзання активізують процес припрацювання, при цьому зменшується час та знос від припрацювання за рахунок механодеструкції мастила, що супроводжується збагаченням вуглецем поверхонь тертя*

*Ключові слова: тертя, припрацювання, трибологічна система, знос, коефіцієнт тертя, перенос, ступінчасте навантаження*

*В работе приведены результаты исследования внешнесилового влияния на процесс формирования трибологических структур этапа приработки системы «БрАЖМц10-3-1,5-АМГ-10-30ХГСА». Показано, что ступенчатое увеличение нагрузки и постоянная скорость скольжения активизируют процесс приработки, при этом уменьшается время и износ от приработки, за счет механодеструкции масла, которое сопровождается обогащением углеродом поверхностей трения*

*Ключевые слова: трение, приработка, трибологическая система, износ, коэффициент трения, перенос, ступенчатая нагрузка*

## 1. Вступ

Одним із напрямів збільшення ресурсу вузлів тертя є не тільки використання матеріалів з підвищеною зносостійкістю, але й оптимізація експлуатаційних режимів роботи трибосистем. Більшість робіт охоплюють дослідження даного явища на етапі стаціонарної роботи, хоча близько 70% зносу припадає на етап припрацювання трибологічних систем (ТС) при початковій роботі та при кожному запуску [1]. Поверхня, сформована під час тертя, має відмінні від вихідної структури властивості та визначає триботехнічну поведінку всього матеріалу. На етапі припрацювання формуються тонкі поверхневі шари, які забезпечують стійкість роботи у подальшій експлуатації. Трибологічні структури отримані від етапу припрацювання потім функціонують в стаціонарному режимі за нелінійним законом синергетики, їх надмірний ріст обмежений ентропією, а мінімальний рівень – вільною енергією [2, 3].

На сьогодні режими припрацювання агрегатів букс-шток амортизаційних стійок, силових циліндрів гідравлічних систем авіаційної техніки встановлюються, як правило, досвідом експлуатації. Тому дослідження впливу режимів тертя на механізм утво-

рення трибологічних структур етапу припрацювання і пошук шляхів зниження часу припрацювання є актуальною задачею. В даних вузлах використовується трибологічна система «БрАЖМц10-3-1,5 – АМГ-10 – 30ХГСА». Початкова робота агрегатів за невідповідних режимів тертя може призводити до підвищеного зносу пар тертя та збільшення ймовірності прояву процесів схоплювання та відмов [3]. Керуючи режимними параметрами, можна впливати на етап припрацювання та стаціонарний процес.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У процесі тертя та зношування твердих тіл, під впливом зовнішніх факторів і самого тертя, відбуваються чисельні фізичні та механічні процеси [4 – 7]. До основних факторів, що визначають фізико-хімічні явища припрацювання можна віднести питоме навантаження –  $P$  (МПа) та швидкість ковзання –  $v$  (м/с).

Навантаження має суттєвий вплив на якість і тривалість припрацювання. Зі збільшенням навантаження в початковий момент зростає частка пластичної деформації тонкого поверхневого шару, що призво-

дить до збільшення кількості тепла, що виділяється, і поглиненої енергії. Високі механічні напружки, зумовлені збільшенням тиску на площадках контакту, зумовлюють дефектність структури поверхонь тертя, що збільшує активність металу. Експериментальні дослідження, проведені різними вченими, показують, що зі збільшенням навантаження до величини, що не перевищує деякого критичного значення, якість припрацювання поверхні поліпшується.

Вплив швидкості виражається через співрозмірність часу існування плями фактичного контакту з часом релаксації виникаючих на плямі контакту напружень.

Слід зазначити, що на сьогодні процес припрацювання поверхонь в присутності мастильного матеріалу, за режимами, які б зменшували як час, так і знос від даного етапу є питанням, одним з найменш вивчених. Актуальність дослідження процесу припрацювання та впливу на нього режимів тертя обумовлена тим, що оптимізація цього процесу сприяє підвищенню довговічності вузлів тертя.

### 3. Мета дослідження

Метою даної роботи є вибір оптимальних режимів етапу припрацювання та дослідження закономірностей механохімічних перетворень мікроструктури поверхонь тертя сталі та бронзи в умовах початкової роботи – припрацювання на прикладі класичної трибологічної системи «БрАЖМц10-3-1,5 – АМГ-10 – 30ХГСА».

### 4. Методика дослідження

Властивості трибологічної пари «бронза (зразок) – сталь (контртіло)» досліджували для випадку бронзи Бр.АЖМц10-3-1,5 та сталі 30ХГСА за умов одностороннього напрямленого ковзання в середовищі гідравлічної рідини АМГ-10 за кінематичною схемою «площина – площина» з коефіцієнтом перекриття 0,25 на розробленому лабораторному пристрої торцевого тертя.

Режимні параметри встановлювали за коефіцієнтом варіації сили тертя (V). Режими, в яких коефіцієнт варіації сили тертя перевищував 40% до уваги не брались, оскільки це свідчить про процес схоплення, заїдання та відмов на етапі припрацювання.

Поверхні тертя бронзи та сталі вивчали методами оптичної мікроскопії на приладі Неофот-21, растрової електронної мікроскопії та рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу на приладі SELMI PEM-106 I, електронної Оже-спектроскопії на Оже-мікросонді JEOL JAMP-10S.

На основі аналітичної моделі процесу тертя та зношування визначили характеристики припрацювання: час та знос від початкового етапу роботи (рис. 1).

Формули для швидкості зносу  $i_t = \frac{dI}{dT}$  та зносу  $I(t)$ , як функції часу  $t$ , мають вигляд:

$$i(t) = (i_0 - \langle i_t \rangle) \exp(-t/T) + \langle i_t \rangle, \quad (1)$$

$$I(t) = (i_0 - \langle i_t \rangle) T [1 - \exp(-t/T)] + \langle i_t \rangle t, \quad (2)$$

де  $i_0$  та  $\langle i_t \rangle$  – початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зносу;  $T$  – час релаксації припрацювання;  $I(t)$  – знос.

На рис. 1 функції (1) і (2) представлені в графічній формі. Експоненти в лівій частині описують еволюційний процес припрацювання, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації  $T$ , а внесок припрацювання у знос – функціонал  $I_0 = (i_0 - \langle i_t \rangle) T [1 - \exp(-t/T)]$ . У формуванні потоків речовини основну роль відіграють процеси самоорганізації, які відбуваються в контактній трибологічній структурі дисипативного типу.

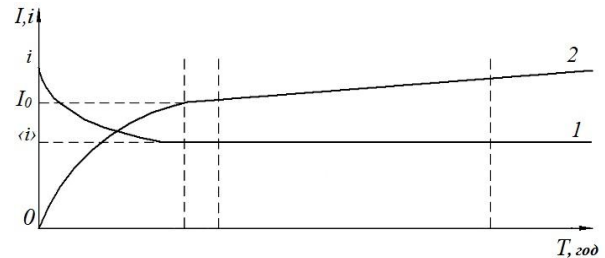


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування  $i$  та зносу  $I$  від часу  $T$

### 5. Результати дослідження

Встановлено, що припрацювання трибологічної системи 30ХГСА – АМГ-10 – БрАЖМц 10–3–1,5 з коефіцієнтом варіації сили тертя 10 – 30% відбувається при навантаженні  $P=2,2$  МПа. Процес припрацювання при даному навантаженні характеризується трьома періодами початкової роботи трибологічної системи (рис. 2), а саме:

- протягом першого періоду відбувається оптимізація якості поверхні, тобто має місце мікрогеометричне припрацювання, яке супроводжується згладжуванням поверхні і якому відповідає коефіцієнт варіації 30% (рис. 2). Етап відрізняється підвищеною швидкістю зношування, яскраво вираженим порушенням суцільності масляної плівки в зазорі трибопари. Це може бути підтвердженням того, що на початковій стадії переважають умови інтенсивного зношування захисних плівок м'якої структурної складової і одночасно умови для виходу їх на поверхню.
- під час другого етапу спостерігається стабілізація моменту тертя, коефіцієнт варіації рівний 15%, що сприяє зміцненню поверхневого шару та стабілізації геометричних показників. За цей період знос незначний, при цьому коефіцієнт тертя сягав мінімальної величини 0,015-0,022, що відповідає нормальному тертю пари бронза-сталь.
- третій етап тривав до повного завершення формування стабільних характеристик якості обох зв'язаних поверхонь, при цьому коефіцієнт варіації становить 10%. Стабілізація варіацій коефіцієнта тертя вважається закінченням припрацювання

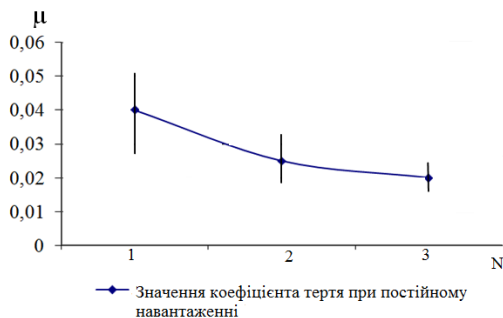


Рис. 2. Значення коефіцієнта тертя  $\mu$  за періоди припрацювання N системи 30ХГСА–АМГ–10–БрАжМц10-3-1,5, при навантаженні  $P=2,2$  МПа, оброблених методом найменших квадратів

Швидкість, як і навантаження, обиралась за поведінням коефіцієнта варіації сили тертя і для навантаження  $P=2,2$  МПа, становила  $v=2$  м/с.

Знос від припрацювання визначався у відповідності з методикою (рис. 1) Вклад зносу від припрацювання при навантаженні  $P=2,2$  МПа сягав 52 мкм. При цьому час припрацювання становив 4 години (рис. 3).

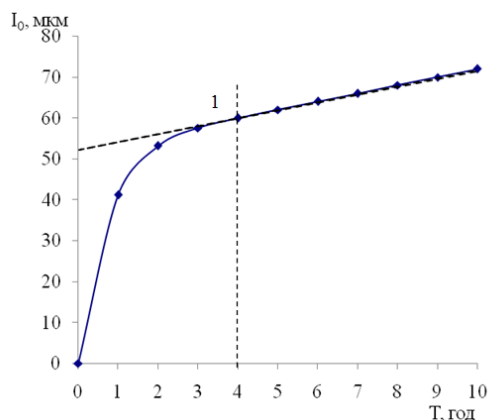


Рис. 3. Зміна зносу  $I_0$  в часі T трибологічної системи 30ХГСА–АМГ–10–БрАжМц10-3-1,5 при постійному навантаженні: 1 – вклад зносу в припрацювання

Чим далі система знаходиться від стаціонарного процесу, тим швидше буде проходити процес припрацювання, актуальним є процес зміни зовнішньосилового впливу в процесі еволюційного етапу припрацювання [8]. Тому з метою зменшення часу припрацювання, розширення діапазону граничних значень навантаження, зносу від даного етапу було обрано ступінчасте збільшення навантаження. Початкове навантаження становило 2,2 МПа та швидкість 2 м/с. Через час ( $T=45$  хв), який відслідковувався у відповідності з коефіцієнтом варіації сили тертя, навантаження підвищувалося на одну сходинку. Для трибологічної системи 30ХГСА–АМГ–10–БрАжМц10-3-1,5, на першому етапі припрацювання  $V=30\%$ , після 45 хвилин роботи, коли  $V=24\%$  навантаження збільшували до максимально-допустимого 2,8 МПа, при цьому коефіцієнт варіації складав 28%, через час T, коефіцієнт варіації сили тертя був рівний 21% після чого навантаження збільшували до 3,1 МПа, відповідно спостерігалось збільшення коефіцієнта варіації до 25%, та

послідуючий спад до 19%, після чого провели довантаження системи  $P=3,7$  МПа, при цьому коефіцієнт варіації сили тертя становив 24%, за 45 хвилин експерименту він стабілізувався до 14%, що свідчило про закінчення процесу припрацювання. Кінцевим ступенем навантаження було 3,7 МПа, оскільки при наступній ступені 4,5 МПа, коефіцієнт варіації перевищував 40%, що супроводжувалося пов'язано з появою диму пари тертя, руйнуванням трибологічних структур.

В процесі дослідження контролювали також температуру мастильного матеріалу, визначали час та знос від даного етапу. Результати експерименту відображені в табл. 1. На кожній ступені навантаження спостерігалось підвищення температури, і при досягненні температури мастильного матеріалу  $50-60$  °С вмикався охолоджувач. Контрольоване саморозігрівання трибологічної системи має позитивний характер, оскільки підвищується енергія активації гідродисперсії її активність та інтенсифікується утворення хемосорбційних плівок [9]. Незначне підвищення температури мастильного матеріалу обумовлює пониження внутрішнього тертя внаслідок зменшення в'язкості і одночасного збільшення поверхнево-активних елементів мастила АМГ – 10, які взаємодіють з твердими тілами ТС.

Порівняльний аналіз результатів табл. 1 дозволив встановити, що ефективність процесу припрацювання при постійній швидкості ковзання 2 м/с і ступінчастому підвищенні питомого навантаження має кращий ефект, ніж дослідження при постійному навантаженні. Кожна ступінь зовнішньосилового впливу, з усіх розглянутих випадків навантаження, призводить до зниження коефіцієнта варіації сили тертя внаслідок збільшення фактичної площі контакту, формування трибологічних структур на кожній ступені навантаження.

Таблиця 1

Триботехнічні характеристики припрацювання в системі БрАжМц -10-3-1,5 – АМГ-10 – 30ХГСа при швидкості  $v=2$  м/с

№ п/п	Навантаження, МПа	Час припрацювання, хв	Знос від припрацювання, мкм		Сумарний знос, мкм	Шлях тертя, м	Коефіцієнт тертя
			Бронза	Сталь			
1	2,2	240	52	12	64	28800	0,02 ±0,003
2	2,2+2,8	220	47	9	56	26400	
3	2,2+2,8+3,1	210	44	7,2	51,2	25200	
4	2,2+2,8+3,1+3,7	180	40	6,8	46,8	21600	

Ретельні дослідження різних ділянок поверхонь тертя пари бронза-сталь, виконані з використанням Оже-мікросконду, виявили нові особливості утворених поверхневих мікроструктур, загалом суттєво відмінні від очікуваних. Зважаючи на характер легувальних мікродомішок, властивих металам пари тертя, прискі-

пливому аналізу підлягали водночас високоенергетичні та низькоенергетичні ділянки спектрів, враховували перекриття та накладення спектральних ліній різних елементів. Несподіваним став висновок про відсутність достатньої концентрації міді на поверхнях тертя сталі в зонах її візуально «мідного» відтінку. В усіх досліджених випадках пари тертя, концентрація міді в поверхневих шарах мікроструктур тертьової поверхні сталі не перевищувала 4,7 ат. %. Водночас, концентрація заліза та кисню у вказаних поверхневих шарах досягала значень 36-44 та 46-54 ат. % відповідно. Навіть за умови тривалого розпорощення поверхонь тертя сталі йонами аргону, що сприяло дослідженню суттєво віддалених від поверхні вглиб металу поверхневих прошарків, концентрація кисню залишалась доволі значною (рис. 4). Це засвідчило, що «мідний» відтінок поверхонь тертя сталі, утворених у досліджуваній парі бронза-сталь, обумовлено кольором поверхневих плівок оксидів заліза субмікронної товщини.

У порівнянні зі сталевими відповідні мікроділянки поверхонь тертя бронзи в усіх випадках є значно менш окисненими (рис. 4). Натомість, вони насичені вуглецем, концентрація якого залишається значною в межах поверхневого шару мікронної товщини та в декілька разів вищою за концентрацію кисню. Суттєве насичення в парах тертя поверхневого шару мідних сплавів вуглецем, не зважаючи на відсутність чисто хімічної взаємодії між ним та міддю, раніше вже виявляли в [10].

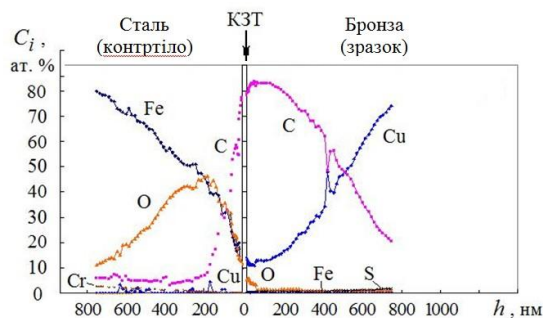


Рис. 4. Концентраційні профілі  $C_i$  елементів у поверхневих шарах пари «бронза (напрямок вправо) – сталь (вліво)»: КЗТ – межа поділу між зразком та контргілом у контактній зоні;  $h$  – відстань від КЗТ

Другий несподіваний результат дав аналіз змін складу мікродомішок у поверхневих шарах бронзи. Дані, наведені на рис. 4, свідчать про наявність у всій мікронній товщині досліджуваних поверхневих шарів бронзи поряд з йонами вуглецю також карбідотвірних елементів хрому та титану, притаманних виключно сталі. Водночас, у цих поверхневих шарах виявлено значно зменшені концентрації «рідних» домішок бронзи БрАЖМц, таких як алюміній та марганець. Натомість, концентрація домішки заліза суттєво збільшена. Причини присутності карбідотвірних елементів сталі та підвищеної концентрації заліза в «глибинних» поверхневих шарах бронзи потребують детальнішого аналізу.

Відповідно, на мікроділянках поверхонь тертя сталі, спостерігаємо збіднення на хром та, певною мірою, вуглець (відносно об'ємної концентрації 4,3-4,7 ат. %).

У межах мікрозон, де не зафіксовано наявності хрому, спостерігаємо сегрегацію марганцю, який, однак, може бути перенесеним у поверхневий шар сталі також як мікродомішка бронзи. На можливість останнього вказує наявність у деяких точках поверхні тертя сталі характерної для даної бронзи мікродомішки олова.

Паралельно з усіма вказаними мікродомішками в поверхневих шарах обох сплавів у зоні тертя зареєстровано присутність у певних концентраціях мікродомішок сірки, що можуть надходити з зон неконтрольованих забруднень поверхонь пари тертя та оливи, а також від фарбника останньої. Сірка, однак, є в певних межах (до 0,03 ат. %) допустимою мікродомішкою сталі, але в найбільших концентраціях зафіксована в поверхневих шарах бронзи (до 6,4 ат. %). Азот, найшвидше, є наслідком впливу антиокиснювального додатку до оливи. Інші можливі легіvní мікродомішки даної пари бронза-сталь (Zn, Pb, Ni, Si, P) в підвищених концентраціях не виявлені, хоча неявні сліди трьох останніх з них реєстрували на окремих границях різних фаз поверхонь тертя сталі (Ni, P) та бронзи (Si, P).

За результатами виконаного Оже-аналізу мікроелементного складу поверхонь тертя пари бронза-сталь на вуглецьований поверхневий шар бронзи за умов тертя, є збагаченим на карбідотвірні мікродомішки сталі (Cr, Ti, а також Fe) та збідненим на власні мікродомішки бронзи (Al, Mn), а окиснений поверхневий шар сталі, навпаки, хоча й меншою мірою, збіднений на власні мікродомішки (Cr, C), але збагачений на мікродомішки бронзи (Al, Sn, Mn, а також Cu).

Натомість, має місце взаємне перенесення елементів спряжених поверхонь контактної зони з однієї на іншу без утворення на кожній з них плівок іншого металу. Швидше слід стверджувати про утворення в контактній зоні тертя доволі товстої (мікронної та субмікронної товщини) та високо концентраційної поверхневої плівки вуглецю, що розчинює інші елементи, або, щонайменше, плівки сильно на вуглецьованих поверхневих структур.

## 6. Висновки

Ефективність процесу припрацювання в значній мірі визначається режимом навантаження. Припрацювання протікає більш ефективно за постійної швидкості ковзання і ступінчастого збільшення навантаження.

Ступінчасте навантаження і одночасне регулювання фрикційного тепловиділення пари тертя призводить до розширення області гранично-допустимих навантажень, зменшення часу та зносу від припрацювання.

Виявлено, що в результаті припрацювання утворюються трибологічні структури насичені вуглецем, за рахунок механодеструкції мастила та перенесення позитивно заряджених елементів з поверхні на поверхню.

## Література

1. Кузьменко, А. Г. Износ узлов трения двигателей при граничной смазке (обзор) [Текст] / А. Г. Кузьменко, О. П. Бабак. // Проблемы трибологии. – 2007. – №3. – С. 61 – 93.
2. Костецкий, Б. И. Трение, смазка и износ в машинах [Текст] / Б. И. Костецкий. – К. Техника, 1970. – 396 с.



3. Кульгавий, Э. А. Триботехнические характеристики и их применение [Текст] / Э. А. Кульгавий // Проблемы трибологии. – 2003. – № 3. – С. 51 – 61.
4. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях [Текст] / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
5. Маслов, Н. Н. Исследование влияния режимов технологических процессов на качество ремонта машин [Текст] / Н. Н. Маслов. – Л.: ВАТТ, 1968. – 272 с.
6. Буяновский, И. А. Развитие трибологии в России [Текст] / И. А. Буяновский // Трение и смазка в машинах и механизмах. Приложение к журналу «Сборка в машиностроении, приборостроении». – 2005. – № 2 (8). – С. 12-18.
7. Бригге, Д. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [Текст] / Д. Бригге, М. П. Сих. – М.: Мир, 1987. – 600 с.
8. Карасик, И. И. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения [Текст]: дис. док. техн. наук: 05.02.04/ И. И. Карасик. – М., 1983. – 450 с.
9. Фёдоров, С. В. Основы трибоэродинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости [Текст] / С. В. Фёдоров. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. – 400 с.
10. Мищук, О. А. Легирование поверхности металлов при трении под влиянием органических поверхностно-активных веществ [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.18/ О. А. Мищук. – К., 1996. – 194 с.

*У статті для забезпечення точності складання з термовпливом багатоелементного з'єднання пропонується удосконалення нормативно-методичного матеріалу обчислення розмірної точності за рахунок отримання удосконаленої формули розрахунку розмірних ланцюгів та класифікації деталей типу «втулка» з визначенням температурних зазорів, що утворюються під дією температури*

*Ключові слова: нормативне забезпечення, якість складання, розмірна точність, термовплив, температурний зазор*

*В статье для обеспечения точности сборки с термовоздействием многоэлементного соединения предлагается усовершенствование нормативно-методического материала вычисления размерной точности за счет получения усовершенствованной формулы расчета размерных цепей и классификации деталей типа «втулка» с определением температурных зазоров, образующихся под действием температуры*

*Ключевые слова: нормативное обеспечение, качество сборки, размерная точность, термовоздействие, температурный зазор*

УДК 621.78:006.91

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ СКЛАДАННЯ З ТЕРМОВПЛИВОМ БАГАТО- ЕЛЕМЕНТНОГО З'ЄДНАННЯ

**О. С. Черкашина**

Асистент

Кафедра охорони праці,  
стандартизації та сертифікації  
Українська інженерно-педагогічна академія  
вул. Університетська, 16,  
м. Харків, Україна, 61003  
E-mail: olgacherkacshina@mail.ru

### 1. Вступ

Однією із складових успішного виходу України на світовий ринок товарів є випуск конкурентоспроміжної продукції. Машинобудування - ключова галузь національного господарства, і його розвиток є визначальним для підвищення якості продукції інших галузей національної економіки. Тому основною задачею сучасного машинобудування є отримання продукції заданої якості.

Якість роботи машин та механізмів в значній степені залежить від якості виготовлення деталей та процесу складання, особливо це актуально для багатоелементного з'єднання. На сьогодні одним із прогресивних

методів складання являється метод з термовпливом, який полягає в нагріві деталь «втулка», що після охолодження призводить до скріплення з деталлю «вал». Такі методи застосовують у відповідальних конструкціях з високими вимогами до таких параметрів як міцність та точність з'єднання [1].

Процес складання базується на розробці конструкторської і технологічної документації. Тобто якість машини закладається на етапі технологічної підготовки виробництва. При розробці технологічного процесу складання обов'язковим являється розрахунок розмірних ланцюгів, що забезпечує розмірну точність складальної одиниці, в результаті чого досягається необхідна якість виробу в цілому [2]. Для