

УДК 621.658

**О.Ф. Гордєєв, Р.М. Полінкевич, Т.І. Четвержук**  
**ДЕМПФУЮЧА ЗДАТНІСТЬ СТИКІВ МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

*В статті викладені підходи щодо оцінки стиків на якісні показники верстатної системи (ВС). Запропонована математична модель ідентифікації впливу стиків на похибку обробки. Розроблено програмне забезпечення STYK, яке дозволяє визначати диференційний вплив всіх стиків на точність обробки. Розглянута методика моделювання та автоматизації процесів ідентифікації деформаційних характеристик стиків металорізальних верстатів за його характеристикам в технологічному робочому просторі. Реалізований принцип дозволяє зменшити загальні витрати і час на забезпечення технологічної надійності верстата в процесі його експлуатації. Запропонована методика визначення балансу зсувів елементів пружної системи забезпечує зручну і надійну ідентифікацію деформаційних і демпфуючих властивостей стиків верстата.*

*Ключові слова:* демпфуюча здатність, контактні деформації, стик, несуча система верстата, коефіцієнт в'язкості, коливання

*Форм. 2. Рис. 2. Літ. 6.*

**А.Ф. Гордеев, Р.М. Полинкевич, Т.И. Четвержук**  
**ДЕМПФИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЫКОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

*В статье изложены подходы к оценке стыков на качественные показатели станочной системы (СС). Предложена математическая модель идентификации влияния стыков на погрешность обработки. Разработано программное обеспечение STYK, которое позволяет определять дифференциальное влияние всех стыков на точность обработки. Рассмотрена методика моделирования и автоматизации процессов идентификации деформационных характеристик стыков металлорежущих станков по его характеристикам в технологическом рабочем пространстве. Реализован принцип позволяет уменьшить общие затраты и время на обеспечение технологической надежности станка в процессе его эксплуатации. Предложена методика определения баланса смещений элементов упругой системы обеспечивает удобную и надежную идентификацию деформационных и демпфирующих свойств стыков станка.*

*Ключевые слова:* демпфирующая способность, контактные деформации, стык, несущая система станка, коэффициент вязкости, колебания.

**A. Gordeev, R. Polinkevich, T. Chetverzhuk**  
**DAMPING CAPACITY JOINTS OF MACHINE TOOLS**

*In this article the approaches to the assessment of joints on quality indicators Machining Systems (MS). A mathematical model to identify the influence of joints error handling. The software STYK, which allows to determine the differential impact of all joints for precision machining. The technique of modeling and automation of identification deformation behavior of joints of machine tools for its technological characteristics of the workspace. Realized principle reduces the overall cost and time to ensure the reliability of the technological machine during its operation. The method of determining the balance shifts elements elastic system provides a convenient and reliable identification of deformation and damping properties of the joints of the machine.*

*Keywords:* damping capacity, contact deformation, joint, machine bearing system, the coefficient of viscosity variations, fluctuations.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основними завданнями верстатобудування, є подальший розвиток виробництва автоматичного устаткування, випереджаюче зростання випуску верстатів з ЧПУ, зростання виробництва унікальних і високоточних верстатів, створення перспективних автоматичних ліній, гнучких автоматизованих виробництв, промислових роботів. Забезпечити підвищення продуктивності металорізальних верстатів у 1,3 ... 1,6 рази, збільшення їх надійності та довговічності в експлуатації, а також підвищення точності металорізальних верстатів не менше ніж на 20...30%.

Це нерозривно пов'язано з підвищенням ефективності та якості продукції, що випускається. Економічно обгрунтоване прагнення до підвищення продуктивності праці, точності і якості металорізальних верстатів виділило значення динамічних явищ, що супроводжують процес різання. Воно викликало необхідність дослідження системи ВПД та окремих її частин в процесі роботи. Продуктивність верстата обмежена стійкістю відносного руху інструмента і заготовки при різанні - допустимим рівнем відносних коливань, тобто визначається динамічними властивостями елементів системи. Точність обробки залежить від зовнішніх впливів на систему при стійкому різанні і динамічних властивостей замкнутої динамічної системи верстата.

**Мета дослідження** – підвищення технічного рівня (вібростійкості, продуктивності, точності та якості обробки) металорізальних верстатів шляхом автоматизованого управління демпфування в стиках їх несучої системи. Розробка й перевірка методики прогнозування точностної надійності вузлів у робочому просторі верстата за інформацією про характеристики стиків з'єднань.

Фундаментальні дослідження демпфуючої здатності стиків розроблені науковцями Д.Н. Решетовим, З.М. Левіної С.С. Кедровим, В.А. Кудіновом. При розгляді питання демпфуючої здатності стиків металорізальних верстатів слід враховувати контактні деформації стиків а також їх жорсткість, адже це взаємопов'язані та нерозривні поняття.

У контакті деталей машин дійсна площа дуже мала. При стисненні куль і циліндрів це пов'язано з формою деталей. В умовах контакту по площини або по циліндровій поверхні це пов'язано з мікро- і макронерівностями, внаслідок чого при малих навантаженнях дійсна площа складає долі відсотка від номінальної. Тому в прецизійних машинах контактні деформації превалюють над власними. Це особливо відноситься до металорізальних верстатів, які характеризуються: великою кількістю рухомих сполучень деталей, малими навантаженнями при остаточних точних операціях і особливо високими вимогами до точності. Роль контактних деформацій ілюструється наступним прикладом: контактні деформації в направляючих верстатів, що мають величини порядку 1 мкм на кожен 0,1 МПа тиску, в середньому рівні деформації чавунного стрижня довжиною 1 м під дією стискуючої напруги, рівної тиску в направляючих.

Контактні деформації при ідеальній площинній стиків або досконалому макроприляганні деталей невеликі. Спостережувані великі зближення в контактах деталей машин відбуваються внаслідок збільшених контактних деформацій на контактуючих вершинах макрохвиль, розпрямлення хвиль і загальних пружних деформацій деталей в зоні контакту. Контактні деформації знижують точність роботи приладів, верстатів і інших прецизійних машин, а також впливають на працездатність деталей і вузлів машин: на коливання і динамічні навантаження, на концентрацію і розподіл тиску в контакті деталей машин, а отже, на їх зносостійкість і довговічність. Ефект контактних деформацій не завжди негативний. Вони вирівнюють розподіл тиску між деформуються поверхнями, що контактують пружно.

Для кращого розуміння механізму контактної деформації застосовують розрахунки пружних переміщень на основі простого моделювання мікро- і макронерівностей. Для технічних розрахунків застосовують емпіричні залежності, отримані на моделях і натурних машинах. При малих номінальних площах контакту (менше 100—150 см<sup>2</sup>) і ретельному взаємному пригоні впливом відхилень від площинної можна нехтувати і приймати зближення  $\delta$  при повторних навантаженнях чавунних і сталевих деталей пропорційним середньому тиску  $\sigma$ , 10-МПа в ступені  $m = 0,5$  (рис 1):  $\eta = c \cdot \sigma^m$ . Значення коефіцієнта  $c$  при глибокому шабренні 1,5; при середньому - 0,8; при фінішному струганні - 0,6; при тонкому шабренні, тонкому точінні по 7-у класу чистоти, шліфуванні по 7—8-у класу від 0,15 до 0,2; при притиранні по 10—12-у класу - 0,07.

При великих номінальних площах контакту пружні зближення значно більше і вони ближче слідує закону Гука. Це пов'язано з великими відхиленнями поверхонь, що сполучаються, від площини, великими власними деформаціями контактуючих деталей і більшою їх роллю в балансі переміщень, а також великим місцевим тиском на макроплямах контакту. Вплив відхилень від площинної вивчався теоретично для різних моделей не площинної однієї з контактуючих поверхонь: параболічній опуклості, параболічній угнутості, хвилястості і угнутості, обкресленою двома площинами, і перевірялося експериментально. Відхилення від площинної в межах 10—15 мкм підвищують контактну податливість в 2—2,5 разу.

Для технічних розрахунків на контактну жорсткість натурних вузлів при центральному навантаженні пружні зближення приймають пропорційними тиску  $\delta = k\epsilon$ , але коефіцієнт контактної податливості  $c$  залежним від початкового тиску. Підвищення коефіцієнтів контактної податливості із збільшенням розмірів стиків (масштабний чинник) при однаковій шорсткості поверхні може досягати великих значень (до 10 разів і більш). Наприклад, коефіцієнт контактної податливості в застосуванні до тих, що направляють може мінятися від 0,03 для моделей до 0,15 для середніх верстатів і до 0,4 мкм/МПа для найбільш важких верстатів. Це пов'язано з погіршенням умов контакту. Значення масштабного чинника виходять експериментально і з розрахунків при завданні відхилень від правильної форми контактуючих поверхонь.

Контактні деформації деталей, що володіють великою власною жорсткістю: кронштейнів, консолей, санчат, підкріплених фартухами - розраховують, розглядаючи їх відносний поворот і зсув як твердих тіл. Розрахунки деформацій деталей, власна жорсткість яких можна співставити з контактною, слід проводити, розглядаючи спільно власні і контактні деформації. У зв'язку з тим, що, як правило, власна жорсткість однієї з контактуючих деталей багато більше, ніж зв'язаною, показана можливість проводити розрахунки по теорії балок або плит на пружній підставі. Це є важливим науковим результатом, що дозволяє вирішити ряд технічних завдань.

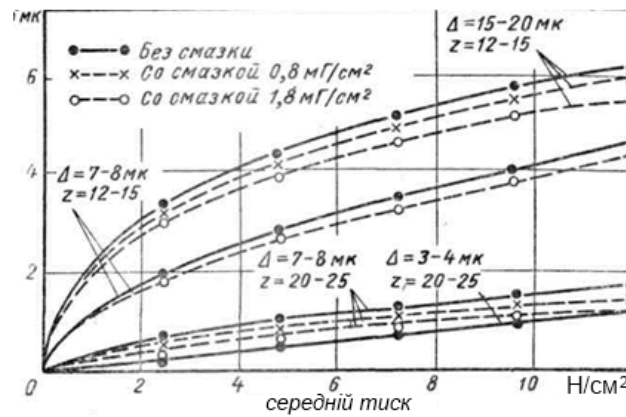


Рис. 1. Залежність між пружним зближенням і середнім тиском в стикі ( $\Delta, z$  - глибина і число плям шабрення; площа стикі  $80 \text{ см}^2$ )

Зіставлення розрахункових і експериментальних прогинань планки, лежачої на напівплощині при різному стані поверхні і, отже, різних коефіцієнтах контактної податливості показує повний збіг. Особливо важливі такі розрахунки для деталей з консолями типу повзунів, пінолей, центрів і так далі. Пружні переміщення навіть таких відносно жорстких деталей, як пінолі і повзуни поперечно-стругальних верстатів, при розрахунку їх без урахування власних деформацій на довжині контакту виходять до 3 разів менше, ніж при точному розрахунку як балок на пружній основі.

Контактні деформації істотно позначаються на крутильній жорсткості приводів. У балансі кутових переміщень приводів верстатів контактні деформації в з'єднаннях зазвичай перевищують крутильні деформації валів. Коефіцієнт контактної податливості в з'єднаннях шпон призматичними шпонками і в зубах кулачкових муфт складає в середньому  $0,3\text{—}0,4 \text{ мкм/МПа}$ .

Контактну жорсткість при коливаннях вивчали по частоті власних коливань бруса з масою на кінці, складеного з дисків, стягнутих гвинтом. Жорсткість не змащених стиків при коливаннях і статичній деформації однакова і не залежить від частоти коливань. Жорсткість змащених стиків при коливаннях у зв'язку з додатковим опором витіканню масла підвищується до 1,5 разу. Підвищення жорсткості тим більше, чим більше кількість і в'язкість мастила і менше початковий тиск.

Контактуючі поверхневі шари володіють не тільки нормальною, але і дотичною податливістю. Для особливо точних розрахунків переміщення (переважно в умовах пружного повороту), а також для розрахунків міцності фрикційних зчеплень представляє значний інтерес демпфуюча здатність стиків металорізальних верстатів.

Класичний підхід у підвищенні динамічної якості несучої системи верстата є використання в ній елементів з високими дисипативними властивостями, які широко використовуються при створенні верстатів. Подальше підвищення вимог до їх стійкості призвело до розроблення динамічних гасителів, що розсіюють енергію коливань елементів несучої системи верстата на резонансних частотах. Однак, діапазон дії цих властивостей обмежений, що знижує динамічні характеристики верстата в різних режимах його роботи.

Для стиків по аналогії з коефіцієнтами внутрішньої в'язкості матеріалів вводяться коефіцієнти нормальної і тангенціальної контактної в'язкості  $\xi_{\text{ст}}$  і  $\zeta_{\text{ст}}$ . Коефіцієнтом в'язкості стикі є питоме демпфування, що доводиться на одиницю площі. У цьому його відмінність від коефіцієнтів нормальної і тангенціальної в'язкості матеріалів. На підставі визначення коефіцієнтів в'язкості при нормальних зсувах в стикі площею  $F$  загасання буде дорівнювати  $h_0 = F\xi_{\text{ст}}$ , при тангенціальних зсувах -  $h_t = F\eta_{\text{ст}}$ .

При повороті навколо осі симетрії стикі загасання визначатиметься по формулі:

$$d_0 = J\xi_{\text{ст}},$$

де:  $J$  — осьовий момент інерції стикі.

Таке уявлення означає, що сила в'язкого тертя в лінійному випадку рівномірно розподілена по стикі, який може розглядатися як сукупність нескінченного числа елементарних пружин і демпферів. Для визначення  $\xi_{\text{ст}}$  можна використовувати наявні дані Д.Н. Решетова і З.М. Левіної,

з яких слідує, що на коефіцієнт нормальної в'язкості дуже сильно впливає кількість мастила (рис. 2).

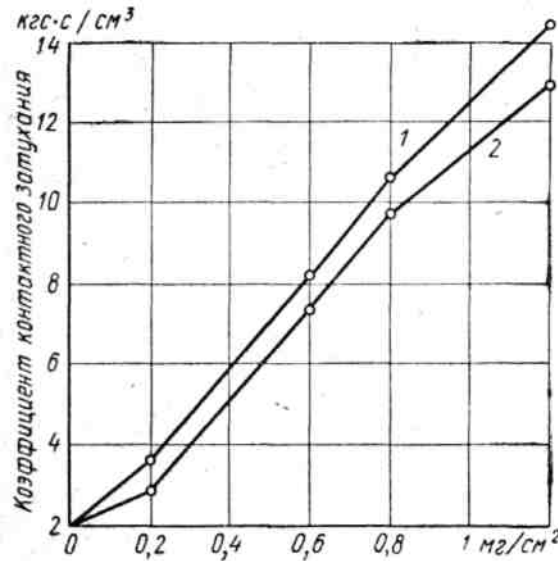


Рис. 2. Залежність коефіцієнта нормальної в'язкості в стикі від кількості мастила при тиску в стикі 0,25—1,38 МПа: 1 — масло індустріальне 45; 2 — масло індустріальне 12

При кількості мастила 1,2 мг/см<sup>2</sup> коефіцієнт нормальної в'язкості в стикі збільшується більш ніж в 7 разів в порівнянні з сухим (не змащеним) стиком (від 2 до 15 МПа·с). Не виявлено істотної різниці між стиками сталевих і чавунних деталей, а також між шабреними і шліфованими стиками деталей. Для стиків чавун — текстоліт коефіцієнт нормальної в'язкості приблизно в 2 рази більше коефіцієнта нормальної в'язкості для стиків чавун—чавун.

Для визначення коефіцієнтів тангенціальної в'язкості можна використовувати дослідження Б.Т. Бресва, О.М. Гельфельда, С.Г. Ухорського на верстаті і В.А. Кудінова і С.Т. Токобаєва на стенді. Для стенду при мастилi індустріальним маслом 45 і тиску в направляючих  $\sigma = 0,09$  МПа коефіцієнт тангенціальної в'язкості  $\xi_{CTm} = 0,012$  МПа·с, при  $\sigma = 0,17$  МПа коефіцієнт  $\xi_{CT} = 0,018$  МПа·с.

При малому тиску в стиках тангенціальна в'язкість істотно залежить від величини цього тиску. Масла з поверхнево-активними (ВНІІ НП-401, Старфак 2) добавками декілька зменшують коефіцієнт тангенціальної в'язкості стиків.

У нерухомих стиках загасання при дотичних коливаннях залежить від амплітуди коливань, зростаючи з її збільшенням. При повторних навантаженнях загасання менше, ніж при першому навантаженні. На підставі визначення постійною часу демпфування  $T_{h,\sigma}$  і  $T_{h,\tau}$ :

$$\eta_{CT} = \frac{T_{h,\tau}}{k_{\tau}}; \quad \xi_{CT} = \frac{T_{h,\sigma}}{k_{\sigma}}.$$

Проводячи аналогію між суцільним середовищем і стиком, можна вважати, що  $T_{h,\sigma} = T_{h,\tau}$ . В середньому демпфуюча здатність нерухомих стиків визначається постійною часу демпфування, яка лежить в межах від  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^4$  с. Порівнюючи ці значення з постійними часу демпфування металів, можна зробити вивід про те, що демпфуюча здатність стиків на один-два порядку вище демпфуючої здатності металів і можна порівняти з демпфуючою здатністю гуми, залізобетону і дерева.

При великому тиску поведінка стиків при коливаннях таке ж, як матеріалу, з якого виготовлені контактуючі деталі. Оскільки демпфуюча здатність матеріалів нижче демпфуючої здатності стиків, то, починаючи з деякого тиску, при його подальшому збільшенні демпфуюча здатність стиків зменшуватиметься.

При тангенціальних коливаннях стик може працювати як би в двох режимах. При першому режимі амплітуда тангенціальних коливань не перевищує величини попереднього зсуву. Попередній зсув є найбільша величина тангенціального зсуву в стикі, після перевищення якого починаються необоротні деформації, тобто звичайне ковзання одного тіла по іншому. В цьому випадку тертя в основному буде в'язким.

Якщо амплітуда коливань перевищує величину попереднього зсуву, то на демпфування починають робити вплив і сили тертя без мастила.

Демпфуванню тангенціальних коливань в стикі при терті без мастила присвячена велика кількість робіт Я.Г. Пановко і його співробітників. Їм же запропонований термін — «конструкційне демпфування». Для стиків з прослизанням характерна наявність оптимального тиску, при якому демпфування має найбільшу величину. При тиску, великому і меншому за оптимальний, демпфування зменшується. Все це відноситься до нерухомих або майже нерухомих стикам, постійні відносні швидкості ковзання в яких малі.

**Висновки:** Проведений аналіз існуючих методик розрахунку і результатів експериментальних досліджень жорсткості і демпфуючої здатності стиків МРВ і верстатного устаткування показав, що:

1. Точність обробки на верстатах може до 80% визначатися жорсткістю і демпфуючої здатністю стиків, які суттєво впливають на показники технологічної надійності верстата.
2. Характеристики стиків (жорсткість і демпфуюча здатність) залежить від багатьох у більшості випадкових факторів: конструкційних, технологічних, експлуатаційних.
3. Характеристики стиків змінюються у часі, характер цих змін у загальному випадку є нелінійним і залежить також від випадкових конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів.
4. Теоретичне визначення характеристик стиків виконується на основі аналітичних і емпіричних формул і методик, які можна застосовувати лише в обмежених випадках.
5. Значний інтерес представляє вивчення жорсткості стиків безпосередньо у вузлах машин і жорсткості всієї машини, коли враховується реальний стан поверхневого шару, розміри його номінальної і фактичної площі, напрям дії навантаження, наявність мастила і тому подібне.

1. *Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І.* Теоретичне визначення контактних деформацій і жорсткості стиків металорізальних верстатів / Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І.// Наукові нотатки Луцьк 2012 – № 38. – С. 45-48
2. *Кудинов В.А.* Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967, – 360 с.
3. *Левина З.М.* Исследование демпфирования в направляющих и разработка комбинированных направляющих качения-скольжения, обеспечивающих высокое демпфирование и плавность перемещений узлов прецизионных станков. Отчет по теме. М.: ЭНИМС, 1977. – 204 с.
4. *Левина З.М., Решетов Д.Н.* Контактная жесткость машин.-М.: Машиностроение, 1971.
5. *Пуш А.В.* Исследование демпфирования для повышения виброустойчивости гидростатических опор применительно к шпинделям станков. Дис. . канд.техн.наук. М., 1974.
6. *Хомяков В.С., Тарасов И.В.* Оценка качества стыков на точность станков./ станки инструменты – 1991 – С. 13-17.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2013.