

Я.О. ЛЯШЕНКО,^{1,2} В.Л. ПОПОВ¹

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik,
FG Systemdynamik und Reibungsphysik
(Sekr. C8-4, Raum M 122, Strasse des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Germany;
e-mails: i.lyashenko@tu-berlin.de, v.popov@tu-berlin.de)

² Сумський державний університет
(Вул. Римського-Корсакова, 2, Суми 40007)

ВПЛИВ КОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА АДГЕЗІЙНУ МІЦНІСТЬ КОНТАКТУ МІЖ ЖОРСТКИМ ІНДЕНТОРОМ І М'ЯКИМ ЕЛАСТОМЕРОМ: ЕКСПЕРИМЕНТ

УДК 539.612; 620.172;
620.193

Вивчається вплив тривалості контакту між сталевим індентором, який піддається корозії, і еластомером на основі водного розчину желатину, на адгезійну міцність контакту. Показано, що збільшення часу контакту приводить до його суттєвого зменшення. У результаті контакт стає настільки міцним, що витягування індентора із еластомера призводить до руйнування поверхні еластомера.

Ключові слова: корозія, еластомер, адгезійна міцність, індентування, квазистатичний контакт.

1. Вступ

В останні десятиліття активно розвивається напрям у механіці, який пов'язаний з вивченням контактних процесів. Незважаючи на те, що від часу публікації найвідомішої класичної роботи в цьому напрямку [1] пройшло вже 140 років, активний поштовх у своєму розвитку механіка контактних взаємодій набула саме останнім часом. Відбувся такий розвиток завдяки появі принципово нових методів чисельного аналізу та зростанню потужності сучасної обчислювальної техніки, а також завдяки удосконаленню експериментальних методів дослідження. До сучасних універсальних чисельних методів, які використовуються для моделювання

контактних процесів, можна віднести метод кінцевих елементів [2], метод граничних елементів [3, 4], метод рухомих клітинних автоматів [5], а також методи молекулярної динаміки [6]. Зазначимо, що у [7, 8] метод граничних елементів був модифікований для розрахунку контактних задач із урахуванням адгезії. Незважаючи на те, що вивчення адгезійного контакту триває вже кілька десятиліть (починаючи з фундаментальних робіт [9–11]), у цій галузі досі залишається багато невирішених питань, які викликають жваву дискусію у провідних наукових групах. Наприклад, до кінця не зрозумілі механізми адгезійної взаємодії шорстких поверхонь [12–14], вплив адгезії на силу тертя під час руху в тангенціальному контакті [15, 16] і т.п. В одній із наших попередніх робіт [8] описано експериментальну установку, за допомогою якої було проведено ряд експериментів з дослідження процесів відриву плоских поверхонь різної геометричної форми від поверхні еластомера з високою адгезією. У ролі такого матеріалу використовувався затвердлий водний розчин желатину. Далі будемо називати

Цитування: Ляшенко Я.О., Попов В.Л. Вплив корозійних процесів на адгезійну міцність контакту між жорстким індентором і м'яким еластомером: експеримент. *Укр. фіз. журн.* **68**, № 5, 348 (2023).

Citation: Lyashenko I.A., Popov V.L. Corrosion effect on the adhesive strength of a contact between a hard indenter and a soft elastomer: An experimental study. *Ukr. J. Phys.* **68**, No. 5, 349 (2023). <https://doi.org/10.15407/ujpe68.5.349>.

вати желатиновий зразок, що використовується в експериментах, еластомером, оскільки він має типові властивості еластомерів (здатність до великих деформацій при практично повній відсутності об'ємного стискання). У роботі [8] розглядався відрив від желатину інденторів із плоскою основою. У цій роботі ми описуємо експерименти з індентування в желатин сферичних та циліндричних інденторів та вплив на адгезійну силу тривалості контакту. Головною особливістю запропонованого дослідження від проведених раніше є те, що індентор, який контактує із желатином (що в основному складається з води), був виготовлений зі сталі, що кородує. У такому випадку процеси корозії істотно впливають на адгезійні властивості контакту. Головна мета запропонованої роботи – вивчення впливу корозії на адгезійну міцність контакту.

2. Методика експерименту

На рис. 1 наведена фотографія розробленого пристрою, що дозволяє вивчати адгезійні процеси. Тут цифрами 1 і 2 позначені приводи напрямленого руху PI M-403.2DG (вони керуються за допомогою контролерів PI C-863, що позначені номерами 6 та 7). Під номером 3 показаний трьохосовий сенсор сили ME K3D40. Задля посилення електричного сигналу, що видає сенсор, використовується чотириканальний підсилювач GSV-1A4 SubD37/2, а для передачі посиленого сигналу комп'ютеру – 16-ти бітний АЦП NI USB-6211. До сенсора сили прикріплений сталевий індентор, який в експерименті занурюється в еластомер 4 (затверділий водний розчин желатину). Поверхня еластомера може фіксуватися під різними кутами у двох напрямках за допомогою нахиляючого механізму 5. Спостереження за еволюцією контактної області відбувається за допомогою відеокамери, що знаходиться на позиції 8. Описана установка дозволяє здійснювати незалежні рухи індентора як у нормальному, так і в тангенціальному напрямках, що дозволяє проводити комплексні дослідження адгезійного контакту (більш детальний опис можливостей обладнання наведений у нещодавній роботі [17]). У запропонованій роботі описуються експерименти з вивчення нормального контакту.

У всіх експериментах, що описуються в запропонованій роботі, як середовище, що володіє адгезійними властивостями, використовувалося желе,

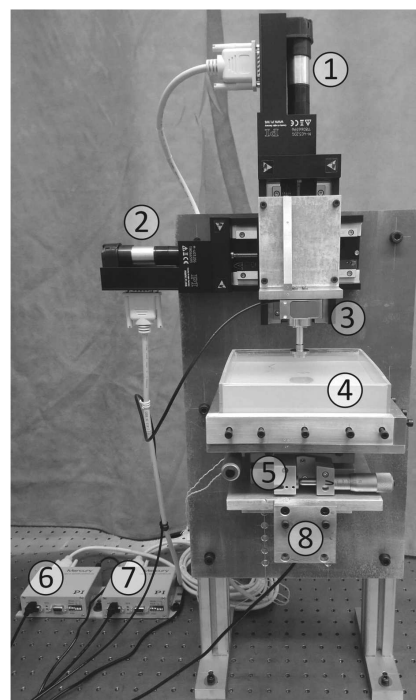


Рис. 1. Зовнішній вигляд експериментальної установки (див. також [14, 17]). Цифрами позначені елементи установки, опис яких наданий в тексті

аналогічно до робіт [8, 18]. Желейна маса була отримана при затвердінні звичайного кухонного желатину виробництва німецької фірми Dr. Oetker. Розчин готувався при розведенні 4 упаковок желатину по 9 г кожна на 1 літр води. При такій концентрації отримане желе залишається у стабільному твердому стані за кімнатної температури (близько 24 °C). Желе заливалося в прямокутну ємність із оргскла з лінійними розмірами 150 × 150 × 40 мм³ (останній розмір – це товщина шару), об'єм розчину при цьому становив 900 мл.

Після затвердіння желатину в контакт з ним наводився сталевий індентор, поверхня якого була відполірована до дзеркального стану, далі відбувався процес індентування та подальшого відриву індентора.

3. Вплив корозії на адгезійну міцність

Для початкового тесту використовувався циліндричний індентор із радіусом основи $a = 5$ мм, що був виготовлений із нержавіючої сталі. Результати експерименту показані на рис. 2. Індентор

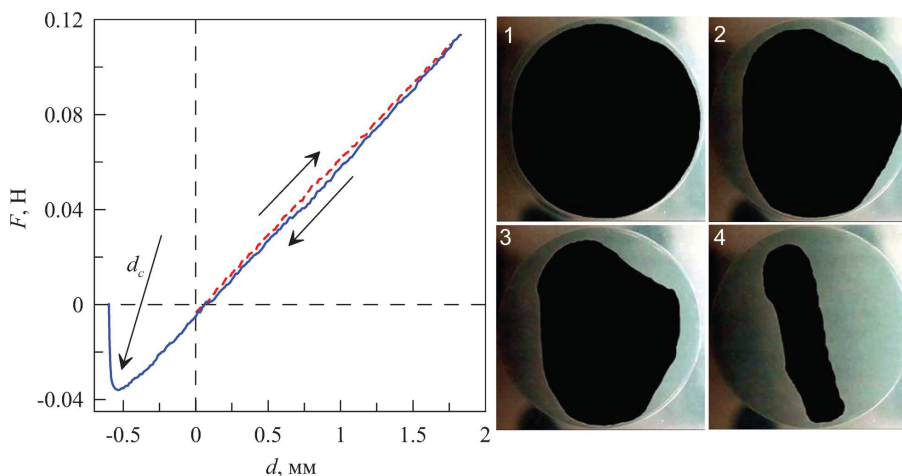


Рис. 2. Залежності нормальної сили F від глибини інденування d при інденуванні в еластомер циліндричного індентора із нержавіючої сталі із радіусом $a = 5$ мм; на фотографіях 1–4 праворуч показані фотографії області контакту на стадії його руйнування, де наявний контакт показаний чорним кольором

приводився в контакт з поверхнею еластомера, потім проводилося його інденування на глибину $d \approx 2$ мм із постійною швидкістю $v = 0,01$ мм/с, після чого він рухався у зворотному напрямку до повного зникнення контакту. З рис. 2 слідує, що в області додатних глибин інденування залежність $F(d)$ близька до лінійної. Використовуючи визначення контактної інкрементальної жорсткості $k = dF/d(d)$, знаходимо значення жорсткості контакту $k \approx 64$ Н/м. З іншого боку, жорсткість k у випадку контакту жорсткого індентора із пружним напівпростором визначається як [19]

$$k = 2E^*a. \tag{1}$$

Еластомер, що використовується, із достатньою точністю можна вважати напівпростором, оскільки його товщина $h = 40$ мм значно перевищує радіус контакту $a = 5$ мм і глибину інденування $d < 2$ мм. Оскільки k та a відомі із експерименту, вираз (1) приводить до значення редукованого модуля пружності еластомера $E^* = 6,4$ кПа. Критична величина глибини інденування d_c (відстань між поверхнями індентора та еластомера, за якої відбувається повне руйнування контакту), визначається за відомою формулою [19]

$$d_c = -\sqrt{\frac{2\pi a \gamma_{12}}{E^*}}. \tag{2}$$

Звідси легко знайти питому роботу адгезії γ_{12} . З експерименту визначити γ_{12} набагато складніше, ніж пружний модуль, оскільки встановити площини поверхні еластомера та індентора ідеально паралельними практично неможливо. Окрім того, поверхні зазначених тіл завжди мають неоднорідності. У зв'язку із цим руйнування контакту на практиці настає дещо раніше, ніж це показує теорія. На рис. 2 наведено також фотографії області контакту між циліндричним індентором та еластомером у процесі руйнування контакту. На фотографії 1 видно, що відрив починається неоднорідно по площині контакту. У процесі відриву зазначена неоднорідність значно збільшується (фотографії 2–4). Однак, відрив все ж таки спостерігається по всій площині контакту, а не у якомусь виділеному куті. Це свідчить про те, що поверхні були відносно точно позиціоновані паралельно одна до іншої. Відповідно до залежності $F(d)$ на рис. 2, критична величина глибини інденування становить $d_c \approx -0,56$ мм. Формула (2) із урахуванням знайдених величин приводить до значення $\gamma_{12} \approx 0,064$ Дж/м².

На рис. 3 показані результати експериментів з інденування сталеві сфери в той самий еластомер, з яким був проведений експеримент, результати якого показані на рис. 2. У випадку, що наведено на рис. 3, індентор був виготовлений зі сталі, що піддається корозії. На рис. 3 показані результа-

ти трьох підряд проведених експериментів (три цикли інденування/відрив), відповідні цим циклам залежності позначені цифрами 1–3. Значення питомої роботи адгезії може відрізнитися від знайденого вище при аналізі рис. 2, оскільки γ_{12} залежить від фізичних властивостей обох контактуючих тіл. Однак для різних марок сталей γ_{12} , як правило, відрізняються несуттєво. Але, якщо інденатор виготовлений зі сталі, що кородує, γ_{12} істотно змінюється зі збільшенням тривалості контакту. В експерименті відбувалося інденування з малою швидкістю руху інденатора $v = 1$ мкм/с, таке значення швидкості вибиралося для забезпечення квазістатичних умов контакту. При цьому протягом одного циклу інденування інденатор перебував у контакті з еластомером (який більш ніж на 95 відсотків складається із води) понад 2,5 год.

На рис. 3 штриховими лініями показані ділянки залежностей, що отримані у фазі інденування, суцільні ділянки кривих відповідають фазі відриву. Підряд здійснюється три цикли інденування, які показані цифрами 1, 2 та 3. У першому циклі нормальна сила F спочатку збільшується до деякого максимального значення. Коли величина глибини інденування стає $d \approx 4$ мм, інденатор починає рух у зворотному напрямку, але його зсув вже не описується початковою залежністю $F(d)$. З рисунка випливає, що $F(d)$ на стадії відриву подає деяку лінійну залежність. Це свідчить про те, що радіус контакту і контактна жорсткість залишаються незмінними. Причина такої поведінки є в тому, що за час взаємодії поверхні інденатора з еластомером його поверхня в області контакту встигає окислитися (кородувати) і інденатор міцно “прикипає” до еластомера. Цей процес у певному сенсі аналогічний до того, як прикипають одна до одної металеві деталі, що знаходяться у контакті, після їх взаємного окислення і появи у зоні контакту продуктів корозії. Наявність продуктів корозії багаторазово підвищує питому роботу адгезії γ_{12} , тому площа контакту практично не змінюється далі при зміні глибини інденування d у заданих межах. Збереження площі контакту постійною при зміні напрямку руху інденатора спостерігалось також у контакті металевого інденатора із гумою [20], де корозійні процеси були відсутніми. Але, в [20] під час руху інденатора у зворотному напрямку завжди настає момент, коли радіус контакту починає зменшуватися за рахунок руйнування адгезійних зв'язків, без

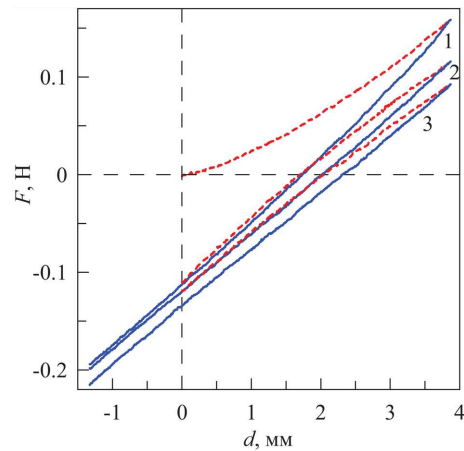


Рис. 3. Залежність нормальної сили F від глибини інденування d при інденуванні в еластомер сферичного інденатора із радіусом $R = 11$ мм, який виготовлений зі сталі, що кородує

руйнування еластомера. У запропонованій роботі описується ситуація, коли контакт може зміцнитися настільки, що відрив інденатора відбувається з обов'язковим об'ємним руйнуванням еластомера.

В експерименті, результати якого проілюстровані на рис. 3, після того, як інденатор піднімається над поверхню еластомера на деяку фіксовану максимальну висоту $d < 0$ мм, він швидко повертається зі швидкістю $v = 0,1$ мм/с до рівня $d = 0$ мм. Далі, після паузи довжиною в одну хвилину, процес інденування повторюється. На всіх залежностях для від'ємних глибин інденування відсутні штрихові ділянки, оскільки протягом швидкого руху інденатора значення діючих сил F і відповідних їм переміщень d не зберігалися.

З рис. 3 слідує, що після першого циклу інденування інші цикли показують майже лінійні залежності $F(d)$, що відповідає практично сталій площі контакту. Однак, ці лінії все ж таки відхиляються від прямолінійної поведінки при великих глибинах інденування. Це говорить про те, що при великих d конфігурація контакту все ж таки змінюється. До таких змін приводить зокрема ефект витончення шару желе за рахунок випаровування води з його поверхні, докладно цей ефект описаний нижче. Кожен наступний цикл інденування приводить до збільшення абсолютних значень сили F в області негативних значень d (інденатор піднятий над поверхню еластомера), до чого також приводить ефект зменшення товщини еластомера.

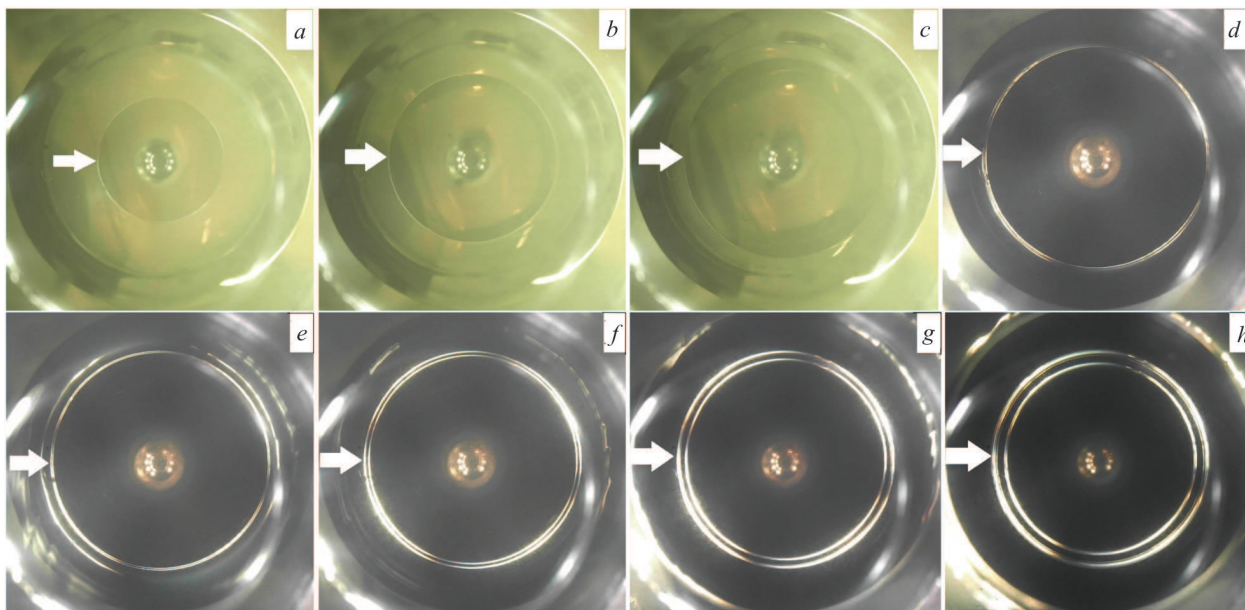


Рис. 4. Зовнішній вигляд контакту між сферичним індентором та еластомером (желе) у процесі індентування та відриву за різних глибин індентування: $d = 1$ мм (індентування) (a); $d = 2$ мм (індентування) (b); $d = 3$ мм (індентування) (c); $d = 3$ мм (відрив) (d); $d = 2$ мм (відрив) (e); $d = 1$ мм (відрив) (f); $d = 0$ мм (відрив) (g); $d = -1$ мм (відрив) (h)

На рис. 4 показані фотографії конфігурації контакту для випадку індентування сфери з радіусом $R = 11$ мм (див. рис. 3). Оскільки використовувався дзеркально відполірований індентор, на його поверхні відображаються елементи оточення, у тому числі в центрі фотографій є відображення елементів світлодіодного освітлення, яке розташоване біля основи відеокамери. Попри ці особливості, межа контакту добре простежується (показана на усіх фотографіях білою стрілкою).

У підпису до рисунка наведено значення глибин індентування d , при яких зроблені відповідні фотографії. Фотографії a–c відповідають фазі індентування, в якій глибина індентування та площа контакту монотонно збільшуються. Фотографії d відповідає таке саме значення d , як і фотографії c ($d = 3$ мм). На наступних фотографіях (e–h) радіус контакту практично не змінюється, хоча вони відповідають фазі відриву. Причина незмінного радіуса у фазі витягування індентора з еластомера полягає в істотному зміцненні контакту, яке відбувається у фазі індентування за рахунок корозії поверхні індентора. Цікавою особливістю є те, що на знімках e–h спостерігаються два кільця на межі контакту. Такий оптичний ефект пов'язаний із появою в області контакту адгезійної шийки.

Діаметр шийки в її центрі є меншим, ніж у місці прилягання до індентора та еластомера. Така шийка візуально відображається у вигляді двох чітких світлих кілець, оскільки контакт фотографується знизу (див. рис. 1). На фотографії e відображення адгезійної шийки показано стрілкою (два дуже близькі кільця). Незамкнене кільце більшого радіуса на знімку, ймовірно, є слідом від зруйнованої межі контакту, оскільки матеріал желатину частково виривається з товщі еластомера при витягуванні індентора.

На рис. 5, a показана фотографія контактної області на початку індентування при $d = 0$ мм, що відповідає другому циклу індентування (залежність 2 на рис. 3). З рис. 5, a слідує, що контактна конфігурація тут практично така сама, як і на останніх фотографіях на рис. 4 (панелі f–h). Це означає, що у другому циклі індентування конфігурація контакту та його розмір залишаються незмінними у широкому діапазоні глибин індентування d , хоча у першому циклі при $d = 0$ мм контакт був повністю відсутній. На рис. 5, a суцільне коло із найбільшим радіусом показує фізичні межі сталевого індентора, які збігаються з аналогічними межами на рис. 4, діаметр цього кола становить 2 см.

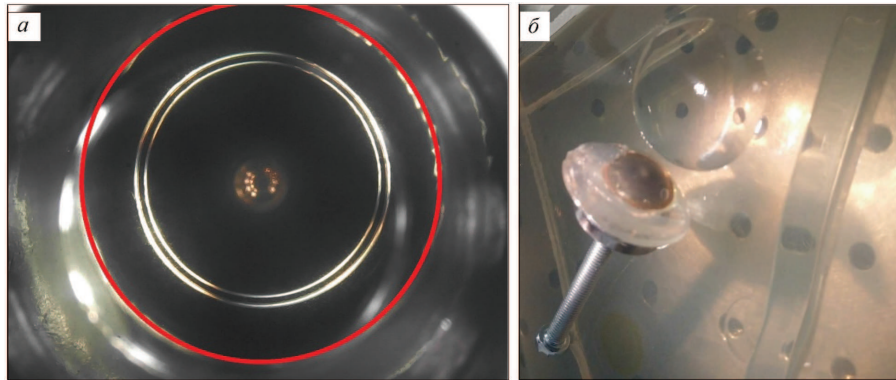


Рис. 5. Фотографія контактної області між сферичним індентором та еластомером (желе) на початку другого циклу індентування, що відповідає кривій 2 на рис. 3 (а); фотографія індентора, що розташований на поверхні еластомера (желе) після руйнування контакту (б)

На рис. 5, б показаний індентор після його відриву від поверхні еластомера (желе). Для здійснення такого відриву знадобилося прикласти значно більшу силу, ніж максимальна сила на рис. 3. При витягуванні індентора разом з ним із еластомера була видалена його суттєва частина, залишивши після себе глибоку сферичну виїмку, яка також простежується на рис. 5, б. Індентор, який перед проведенням експерименту був дзеркально відполірований, в області контакту за рахунок корозії втратив свої дзеркальні властивості і його поверхня набула характерного жовтого відтінку.

На рис. 6 наведені результати наступної серії експериментів з індентором більшого радіуса $R = 22$ мм. Тут також було проведено три цикли індентування. Однак, на відміну від описаного вище випадку, тепер у кожному циклі індентування при відриві індентора від желе відбувається повне руйнування адгезійного контакту. При цьому адгезійна міцність контакту (мінімальна зовнішня сила, яку потрібно прикласти для руйнування контакту) для першого циклу індентування (крива 1) значно вища, ніж для наступних циклів. Пов'язано це із процесами корозії. У всіх трьох циклах індентування при відриві індентора від еластомера площа контакту монотонно зменшується до нуля, але у першому циклі вже відбувається часткове руйнування поверхні еластомера (желе). При цьому деяка частина еластомера залишається на поверхні індентора. Тому в наступних двох циклах індентування на інденторі існують ділянки, в яких здійснюється не прямий контакт індентора з еласто-

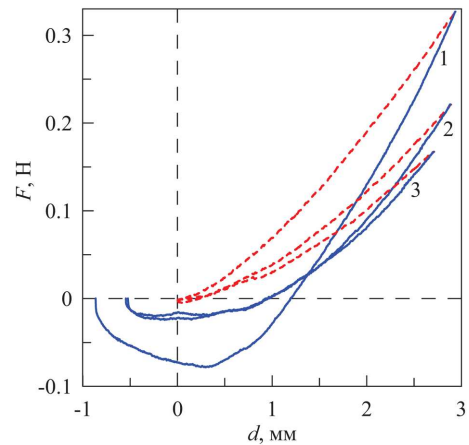


Рис. 6. Залежності нормальної сили F від глибини індентування d при індентуванні в еластомер сферичного індентора із радіусом $R = 22$ мм, що виконаний зі сталі, яка піддається корозії

ром, а контакт еластомера з еластомером, такий контакт має меншу адгезійну міцність. Нормальна сила F , що відповідає максимальному значенню глибини індентування d , у кожному наступному циклі індентування істотно знижується. Цей ефект викликаний в основному зменшенням товщини еластомера (водного розчину желатину) за рахунок випаровування вологи з його поверхні, а також частково із руйнуванням поверхні еластомера при кожному наступному циклі індентування.

На рис. 7, а наведена фотографія індентора з радіусом $R = 22$ мм після його відриву від еластомера. У цьому випадку для руйнування контакту

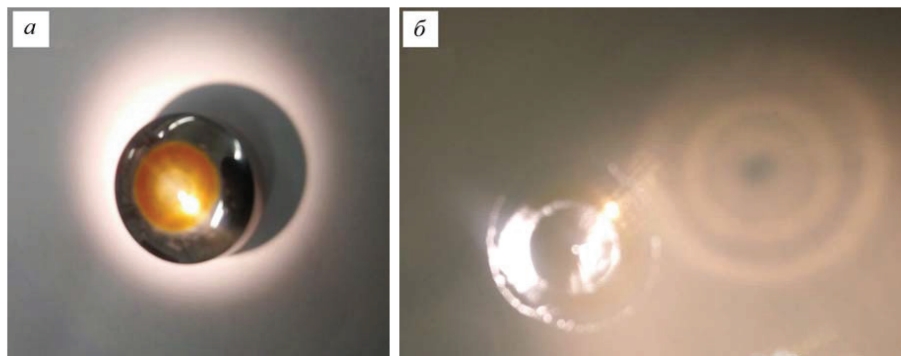


Рис. 7. Фотографія індентора з радіусом $R = 22$ мм після експерименту (а); фотографія поверхні еластомера після експерименту (б)

не потрібно прикладати додаткову силу, оскільки руйнування відбувається в діапазоні глибин індентування, що використовуються в експерименті (див. рис. 6). У центрі індентора, що зображений на рис. 7, а, чітко простежуються сліди корозії, які привели до зміни кольору його поверхні в області контакту. Також на поверхні індентора присутні частки еластомера, але їх обсяг набагато менший, ніж це спостерігалось на рис. 5, б. Ступінь руйнування контактної області добре візуалізується на рис. 7, б, на якому наведена фотографія поверхні еластомера після повних трьох циклів індентування. У верхньому правому куті фотографії можна спостерігати збільшене зображення контактної області, що сформоване потоком світла, яке проходить через поверхню еластомера. На цьому зображенні чітко видно окремі кола різного радіуса, наявність яких свідчить про неоднорідний характер процесу руйнування.

4. Вплив тривалості контакту

Описані вище експерименти показали, що за наявності корозійних процесів у зоні контакту тривалість контакту істотно впливає на його адгезійну міцність. Для детального з'ясування характеру такого впливу було проведено додаткову серію експериментів, у якій циліндричний індентор з діаметром $D = 10$ мм занурювався в еластомер (желе) зі швидкістю $v = 5$ мкм/с на глибину $d = 1,5$ мм. Після цього індентор залишався в такому положенні протягом фіксованого часу T , а потім піднімався над поверхнею желе на відстань $d = -6$ мм (значення $d < 0$ відповідають положенням індентора над поверхнею еластомера) із тією самою швидкістю 5 мкм/с. У цій серії експериментів використову-

вався знову приготовлений еластомер. І хоча він був виготовлений аналогічним чином, його пружні характеристики можуть відрізнитися від описаних вище. Для їх визначення було проведено серію додаткових експериментів. На рис. 8 показані отримані результати. Рис. 8, а демонструє залежності нормальної сили F від глибини індентування d в експерименті, в якому досліджувався вплив часу спокою індентора T на адгезійну міцність. На рисунку показані значення часу T , протягом якого індентор залишався нерухомим у контакті з еластомером за максимальної глибини індентування. Еластомер (желе) охолоджувався в холодильнику, після чого протягом декількох годин прогрівався за кімнатної температури. Після цього проводився експеримент з індентування. Перший експеримент був проведений для часу очікування $T = 120$ хв. Відповідна крива навантаження $F(d)$ у фазі індентування (перша чверть координатної залежності, верхня пунктирна лінія) показує інший нахил, у порівнянні з іншими кривими, що у даному випадку відповідає підвищеному значенню модуля пружності еластомера. Це пов'язано із тим, що до початку першого експерименту еластомер не встиг прогрітися до кімнатної температури. Проте, у фазі відриву індентора нахил всіх залежностей $F(d)$ є приблизно однаковим, а саме у фазі відриву визначається адгезійна міцність контакту, що вивчається у цій роботі.

Усі наведені на рис. 8, а залежності демонструють ефект зниження пружної сили протягом спокою індентора. Тому крива $F(d)$, яка відповідає стадії відриву, завжди проходить нижче, ніж аналогічна залежність для стадії навантаження. Особливо сильно цей ефект помітний для $T = 120$ хв.

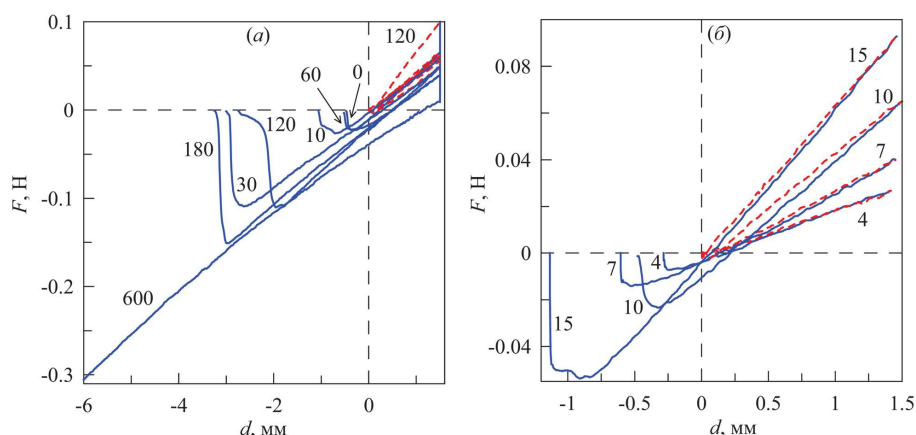


Рис. 8. Залежності нормальної сили F від глибини індуентування d при індуентуванні сталевому циліндричному індуентору з діаметром $D = 10$ мм у еластомер (желе) (а). Білі кривих у хвилинах наведений час, протягом якого індуентор залишався нерухомим за максимальної глибини індуентування $d_{\max} = 1,5$ мм; результати експериментів з індуентування сталевих циліндричних індуенторів різного діаметра з нержавіючої сталі, білі кривих у міліметрах наведено діаметри індуенторів (б); залежність для індуентора $D = 10$ мм співпадає із залежністю, що показана на рис. 8, а, – цей індуентор був виконаний зі сталі, що піддається корозії

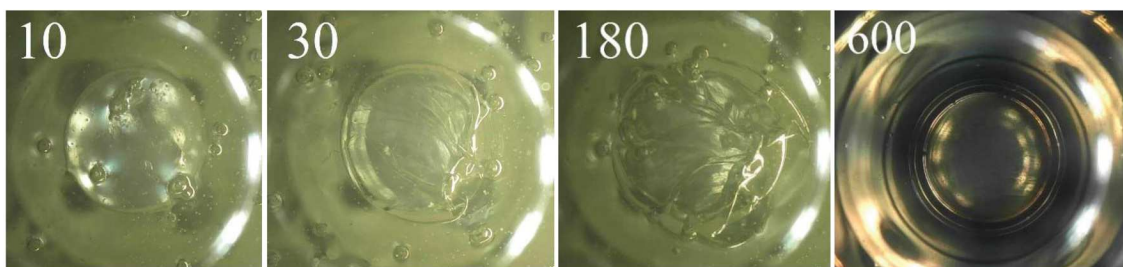


Рис. 9. Фотографії контактних областей після експериментів, результати яких показані на рис. 8, а. На панелях показано значення часів очікування T , що відповідають фотографіям

і $T = 600$ хв. Для $T = 120$ хв. ми пов'язуємо це із тим, що під час першого експерименту еластомер продовжував нагріватися до кімнатної температури, тому його пружність зменшувалася. Однак, в експерименті із $T = 600$ хв. зменшення сили пов'язано із тим, що за час зупинки з поверхні еластомера (желе) випаровується волога і він стає тонкішим.

В експерименті з $T = 600$ хв. за час контакту за рахунок корозійних процесів індуентор настільки “прикипає” до желе, що повне руйнування контакту може бути здійснене лише при відриві частини поверхні еластомера від його загальної маси (див. рис. 5, б). Тому тут навіть за сили $F = -0,3$ Н спостерігається повний контакт (рис. 8, а). Хоча за відсутності корозії контакт руйнується для індуентора з діаметром $D = 10$ мм вже

за значення $F = -0,023$ Н, що слідує з рис. 8, б (крива 10).

На рис. 8, а тільки у випадках $T = 0$ і 60 хв. область контакту після відриву індуентора не руйнується. У решті випадків область контакту руйнується, а на індуенторі залишаються частки еластомера. У процесі індуентування завдяки наявності хімічних неоднорідностей та механічних нерівностей корозійні процеси на поверхні індуентора протікають нерівномірно [21]. Якщо утримувати індуентор у контакті не дуже тривалий час (див., наприклад, криву $T = 30$ хв.), досить міцні для подальшого руйнування еластомера зв'язки встигають утворитися лише в деяких місцях. При відриві індуентора він вириває у максимально зміцнених місцях матеріал еластомера із поверхні. Як результат, у фазі відриву збільшують

ться абсолютні значення критичної сили та глибини інденування, за яких відбувається руйнування контакту. Якщо контакт існує досить довго (див. випадок $T = 600$ хв.), за цей час встигають зміцнитися усі ділянки і контакт стає по всій площі міцнішим, ніж молекулярні зв'язки всередині еластомера. Для руйнування такого контакту потрібно прикласти суттєво більшу силу порівняно з випадком зворотного руйнуванням адгезійних зв'язків. Це призводить до ситуації, що показана на рис. 5, б.

На рис. 9 показані фотографії поверхні еластомера після руйнування контакту для деяких значень часу очікування T , які відповідають експериментам, залежності $F(d)$ для яких наведені на рис. 8, а. З рис. 9 слідує, що у випадку $T = 10$ хв. пошкодження відсутні. У випадку $T = 600$ хв. на фотографії спостерігаються концентричні кола. Ця ситуація відповідає повному “прилипанню” індентора до еластомера і аналогічна до показаної на рис. 4 (f-h) та на рис. 5, а. На рис. 9 ($T = 10, 30$ і 180 хв.) простежуються описані вище неоднорідності на поверхні желе у вигляді відкритих бульбашок повітря, що утворюють згодом кратери, з яких інтенсивно випаровується волога, що призводить до деградації поверхні еластомера (желе)¹.

Повернемося до рис. 8, б, на якому наведені залежності $F(d)$, що відповідають інденуванню циліндрів з різними діаметрами D , які в міліметрах вказані біля відповідних кривих. Користуючись результатами вимірювань та формулами (1) та (2), розрахуємо пружні та адгезійні параметри еластомера. Для різних інденторів отримуємо такі значення: $D = 4,0$ мм ($E^* \approx 5,3$ кПа, $\gamma_{12} \approx 0,026$ Дж/м²); $D = 7,0$ мм ($E^* \approx 4,2$ кПа, $\gamma_{12} \approx 0,048$ Дж/м²); $D = 10$ мм ($E^* \approx 5$ кПа, $\gamma_{12} \approx 0,026$ Дж/м²); $D = 15$ мм ($E^* \approx 4,4$ кПа,

¹ У цьому полягає недолік використання желатину як еластомера при проведенні адгезійних експериментів – його пружні властивості змінюються із часом завдяки випаровуванню вологи, а поверхня швидко деградує. При аналізі експериментальних результатів зазначені особливості, що призводять до зниження відтворюваності експериментів, необхідно враховувати. Гарною альтернативою є використання прозорих сортів гуми [14, 15, 20], пружні та адгезійні властивості яких набагато стабільніші у часі. Однак, зазначена гума не підходить як еластомер для досягнення мети запропонованої роботи – вивчення впливу корозії при контакті сталевого індентора з водою.

$\gamma_{12} \approx 0,059$ Дж/м²). Як видно, параметри еластомера дещо відрізняються у різних експериментах, що підтверджує нестабільність характеристик желатину у часі. Для попереднього еластомерного зразка (див. рис. 2, а) розраховані аналогічним чином параметри набували близьких значень $E^* \approx 6,4$ кПа та $\gamma_{12} \approx 0,064$ Дж/м².

У серії експериментів, результати якої наведені на рис. 8, використовувався один еластомерний зразок. Як зазначено вище, параметри еластомера змінюються із часом, що ускладнює порівняльний аналіз результатів, що отримані у різних експериментах. Тому було проведено додаткову серію експериментів, у якій було виготовлено 7 ідентичних зразків желейних еластомерів, які зберігалися при температурі 7 °С. Об'єм кожного желейного об'єкта не перевищував 30 г, тому його можна було швидко нагріти до кімнатної температури. Після того, як черговий зразок піддавався під час експерименту руйнуванню, він замінювався на ідентичний, який попередньо нагрівався до кімнатної температури. У цій серії експериментів індентор спочатку занурювався в еластомер на глибину $d = 1,5$ мм, після чого піднімався на відстань $d = -5$ мм. Отримані результати показані на рис. 10. На рис. 10, а криві 1 показують залежність $F(d)$, яка відповідає часу спокою індентора $T = 600$ хв. (штрихова частина залежності – фаза інденування, суцільна – фаза відриву). З рисунка випливає, що за проміжок часу, протягом якого індентор залишався нерухомим, нормальна сила F зменшилася до нуля і навіть змінила свій знак. На попередньому рис. 8 спостерігається аналогічний, хоча і менш виражений ефект. Цей ефект пов'язаний із тим, що з поверхні еластомера (водне желе) відбувається інтенсивне випаровування вологи у навколишнє середовище, за рахунок чого товщина еластомера з часом зменшується. Для зручності представлення експериментальних результатів виключимо із залежностей ефект витончення еластомера. У фазі навантаження залежність $F(d)$, що наведена на рис. 10, а, відповідає жорсткості контакту $k \approx 28$ Н/м. Глибини інденування $d = 1,5$ мм тут відповідає максимальна пружна сила $F_1 \approx 0,0384$ Н. У момент, коли індентор починає рух вгору після зупинки тривалістю T , ця сила вже становить $F_2 \approx -0,0016$ Н. Різниця між силами становить $\Delta F = F_1 - F_2 = 0,04$ Н. Знаючи жорсткість контакту k , обчислимо зміну товщини

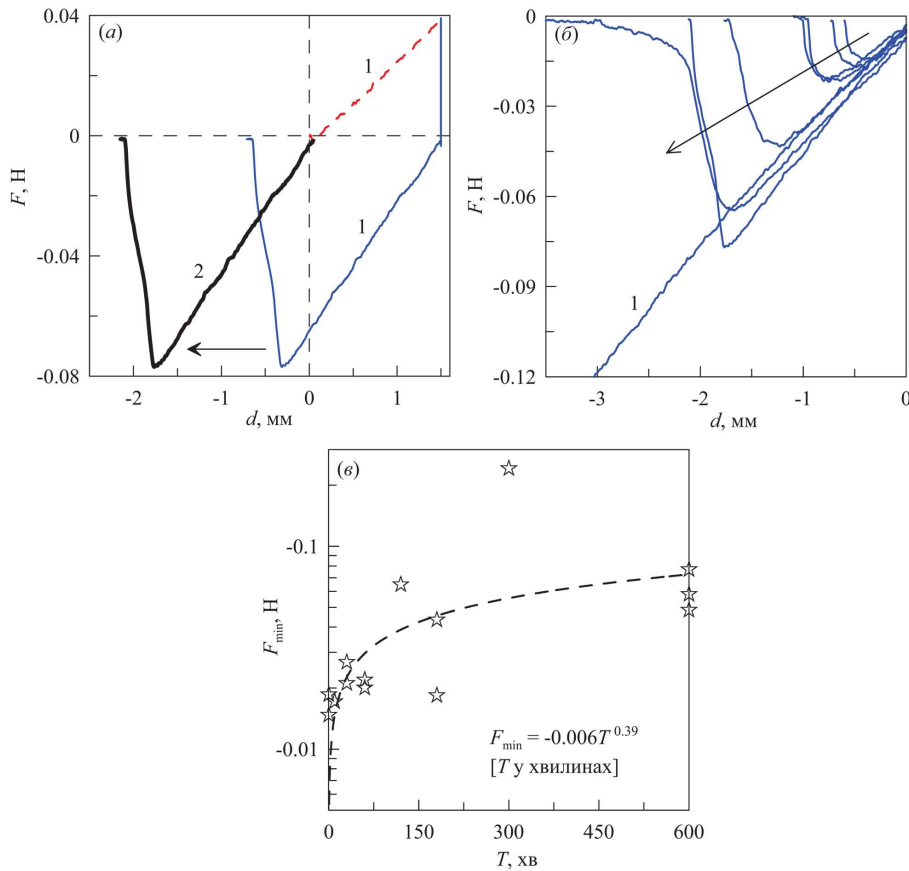


Рис. 10. Виміряна залежність $F(d)$, що відповідає часу спокою індентора в контакті $T = 600$ хв. (крива 1, пунктирна ділянка – фаза індентування, суцільна – фаза відриву) та перерахована ділянка залежності для фази відриву із урахуванням зменшення товщини желіної маси (крива 2) (а); залежності, що відповідають фазі відриву індентора, для різних часів спокою індентора T (б). Криві у напрямку стрілки відповідають величинам $T = 0, 10, 60, 30, 180, 600$ і 120 хв. Крива 1 відповідає часу $T = 300$ хв.; в – залежність мінімальної нормальної сили F_{\min} у фазі відриву від часу спокою індентора T , отримана із результатів, що частково наведені на рис. 10, б

еластомера: $\Delta l = \Delta F/k \approx 1,43$ мм. Таким чином, за час T випарувався шар води, який склав товщину, приблизно рівну глибині індентування. На цю розраховану величину Δl необхідно змістити вліво залежність $F(d)$, що відповідає відриву індентора. Ця процедура еквівалентна перенесенню нижньої кривої 1 на рис. 10, а вліво таким чином, щоб вона торкалася кривої навантаження (штрихова лінія), оскільки при незмінній товщині еластомера фази індентування і відриву для циліндричного індентора повинні описуватися однією і тією ж залежністю $F(d)$. На рис. 10, а лінією 2 показана перерахована таким чином залежність $F(d)$, яка відповідала б ситуації, коли товщина еластомера не змінюється.

Вищеописана процедура паралельного перенесення залежностей $F(d)$ не змінює значень нормальної сили F . Тому на визначення величини адгезійної міцності контакту таке перенесення не впливає і здійснюється воно виключно для зручності подання експериментальних залежностей на одному рисунку. Оброблені залежності для різних значень часу зупинки індентора T показані на рис. 10, б. З рисунка випливає, що в середньому контакт за рахунок корозії із часом зміцнюється. Однак, експериментальні результати не дають монотонного збільшення адгезійної міцності контакту зі збільшенням часу T . Так, для $T = 300$ хв. (крива 1) контакт для вибраного діапазону глибин індентування не руйнується, хоча при $T = 600$ хв. руй-

нування відбувається. Пов'язано це із тим, що часу $T = 300$ хв. вже достатньо для того, щоб по всій області контакту відбулися процеси корозії. При цьому міцність адгезійних зв'язків (з урахуванням хімічних корозійних процесів) стає набагато вищою, ніж міцність когезійних зв'язків у середині желатину. В обох випадках ($T = 600$ хв. і $T = 300$ хв.) при руйнуванні контакту індентор вириває частину еластомера із поверхні, тобто відбувається руйнування контактної області. Із часом міцність контакту може збільшуватися й надалі. Однак після того, як достатньо прокородувала вся поверхня індентора та адгезійні зв'язки між індентором та еластомером стали міцнішими, ніж зв'язки між молекулами в еластомері, подальше збільшення міцності контакту не впливає на критичну силу, при якій відбувається руйнування. На критичну силу впливають багато інших факторів – ступінь гладкості поверхні еластомера (желе), ступінь паралельності поверхонь еластомера та індентора, хімічні та механічні неоднорідності тощо. Саме вплив цих факторів і призводить до немонотонності залежності критичної сили від часу T , яка показана на рис. 10, в. Тут для однакових часів спокою індентора T було проведено декілька експериментів. Видно, що критичні сили в експериментах при однакових значеннях T можуть відрізнятися. Проте у середньому експериментальні результати свідчать про збільшення міцності контакту зі зростанням часу T . Штриховою лінією на рис. 10, в показана апроксимація експериментальної залежності степеневою функцією

$$F_{\min} = -6 \cdot 10^{-3} T^{0,39}, \quad (3)$$

що була отримана методом найменших квадратів. При такому розкиді експериментальних результатів (значень критичної сили) не можна стверджувати, що апроксимація (3) точно визначає залежність $F_{\min}(T)$, проте вона показує стійку тенденцію збільшення міцності контакту зі збільшенням його тривалості.

5. Висновки

У роботі описані експерименти з інденування сталевих інденторів в еластомер, який є затверділим водним розчином желатину. Було з'ясовано, що завдяки корозії контакт зміцнюється із часом. Виявлено три різні режими, залежно від тривалості

контакту. При нетривалому контакті відрив індентора відбувається оборотно без пошкоджень поверхні еластомера. При зростанні тривалості контакту еластомер частково руйнується при відриві індентора і залишається на його поверхні. І після перевищення тривалістю контакту деякого критичного значення він зміцнюється настільки, що при відриві індентора від поверхні желатину відбувається його об'ємне руйнування. Відбувається це, оскільки по всій області контакту хімічні зв'язки між індентором і желатином стають набагато міцнішими, ніж зв'язки між молекулами всередині желатину. У цьому випадку для відриву індентора необхідно прикласти суттєву силу, яка буде достатньою для об'ємного руйнування еластомера.

У випадку, коли еластомер руйнується частково, можливе проведення кількох циклів інденування в його поверхню. При цьому у всіх послідовних циклах інденування реєструються різні значення нормальної сили, за якої відбувається руйнування контакту. Максимальне значення сили спостерігається у першому циклі, у якому контакт зміцнюється завдяки процесам корозії. Наступні цикли інденування показують зниження адгезійної міцності, оскільки в деяких ділянках контакту здійснюється не прямий контакт між індентором і еластомером, а контакт між еластомером, що лишається на поверхні індентора, і еластомером підкладки, а такий контакт має набагато меншу адгезійну міцність.

Було виявлено, що за досить тривалого контакту еластомер стає тонкішим завдяки випаровуванню вологи з його поверхні, за рахунок чого нормальна сила зменшується. Такий ефект є недоліком еластомерів на основі водних розчинів желатину та його необхідно враховувати при обробці експериментальних даних.

Робота виконана за фінансової підтримки Німецького науково-дослідного товариства (Deutsche Forschungsgemeinschaft: DFG), проект PO 810-55-3.

1. Н. Hertz. Über die berührung fester elastischer körper. *J. für die reine Angew. Math.* **92**, 156 (1882).
2. J.N. Reddy. *An Introduction to the Finite Element Method (3rd Ed.)* (McGraw-Hill, 2005) [ISBN: 9780071267618].
3. P.K. Banerjee. *The Boundary Element Methods in Engineering (2nd ed.)* (McGraw-Hill, 1994) [ISBN: 0-07-707769-5].

4. R. Pohrt, Q. Li. Complete boundary element formulation for normal and tangential contact problems. *Phys. Mesomech.* **17**, 334 (2014).
5. S.G. Psakhie, Y. Horie, S.Yu. Korostelev, A.Yu. Smolin, A.I. Dmitriev, E.V. Shilko, S.V. Alekseev. Method of movable cellular automata as a tool for simulation within the framework of mesomechanics. *Russ. Phys. J.* **38** (11), 1157 (1995)
6. M.H. Müser. Elastic contacts of randomly rough indenters with thin sheets, membranes under tension, half spaces, and beyond. *Tribol. Lett.* **69**, 25 (2021).
7. R. Pohrt, V.L. Popov. Adhesive contact simulation of elastic solids using local mesh-dependent detachment criterion in boundary elements method. *Facta Univ. Ser. Mech. Eng.* **13**, 3 (2015).
8. V.L. Popov, R. Pohrt, Q. Li. Strength of adhesive contacts: Influence of contact geometry and material gradients. *Friction* **5**(3), 308 (2017).
9. K.L. Johnson, K. Kendall, A.D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc. Royal Soc. Lond. A* **324** (1558), 301 (1971).
10. B.V. Derjaguin, V.M. Muller, Y.P. Toporov. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *J. Colloid Interface Sci.* **53** (2), 314 (1975).
11. D. Maugis. Adhesion of spheres: The JKR-DMT-transition using a Dugdale model. *J. Colloid Interface Sci.* **150** (1), 243 (1992).
12. M. Ciavarella, A. Papangelo. A generalized Johnson parameter for pull-off decay in the adhesion of rough surfaces. *Phys. Mesomech.* **21** (1), 67 (2018)
13. A. Pepelyshev, F.M. Borodich, B.A. Galanov, E.V. Gorb, S.N. Gorb. Adhesion of soft materials to rough surfaces: Experimental studies, statistical analysis and modelling. *Coatings* **8**, 350 (2018).
14. I.A. Lyashenko, R. Pohrt. Adhesion between rigid indenter and soft rubber layer: Influence of roughness. *Front. Mech. Eng.* **6**, 49 (2020).
15. V.L. Popov, Q. Li, I.A. Lyashenko, R. Pohrt. Adhesion and friction in hard and soft contacts: Theory and experiment. *Friction* **9**, 1688 (2021).
16. J.R. Parent, G.G. Adams. Adhesion-induced tangential driving force acting on a spherical particle lying on a sinusoidal surface. *J. Adhes.* **92** (4), 273 (2016).
17. I.A. Lyashenko, V.L. Popov, R. Pohrt, V. Borysiuk. High-precision tribometer for studies of adhesive contacts. *Sensors* **23**, 456 (2023).
18. I. Lyashenko, V. Borysiuk. Stick-slip motion in the contact between soft elastomer and spherical hard steel indenter: Model explanation of superplasticity mode in metal samples with grain boundary defects. *Procedia Struct. Integr.* **36**, 24 (2022).
19. V.L. Popov, M. Heß, E. Willert. *Handbook of Contact Mechanics. Exact Solutions of Axisymmetric Contact Problems* (Springer, 2019) [ISBN: 978-3-662-58708-9].
20. I.A. Lyashenko, V.L. Popov. Dissipation of mechanical energy in an oscillating adhesive contact between a hard indenter and an elastomer. *Tech. Phys. Lett.* **46** (11), 1092 (2020).
21. I. Argatov. Mechanics of heterogeneous adhesive contacts. *Int. J. Eng. Sci.* **190**, 103883 (2023).

Одержано 14.04.23

I.A. Lyashenko, V.L. Popov

CORROSION EFFECT ON THE ADHESIVE STRENGTH OF A CONTACT BETWEEN A HARD INDENTER AND A SOFT ELASTOMER: AN EXPERIMENTAL STUDY

The influence of the duration of a contact between a steel indenter susceptible to the corrosion and a water-containing gelatin-based elastomer on the contact adhesion strength has been studied. It is shown that the growth in the contact duration leads to the substantial contact strengthening. As a result, the contact becomes so strong that the pulling of the indenter out of the elastomer causes the destruction of the elastomer surface.

Keywords: corrosion, elastomer, adhesive strength, indentation, quasi-static contact.