

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОЇ АРМАТУРИ В ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБАХ ПРИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННІ

М. С. Хорольський, А. Ф. Санін

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро,  
49010, Україна*

**Анотація.** В гумометалевих виробках (ГМВ) з тонкостінною арматурою для об'єктів ракетно-космічної техніки (РКТ) при їх виготовленні на границі «метал-адгезив-гума» виникає напружено-деформований стан (НДС), що призводить з терміном часу до розшарування між арматурою і гумою. В статті сформульовані основні підходи для зниження НДС в ГМВ та забезпечити їх роботоздатність в об'єктах РКТ на протязі гарантійного терміну експлуатації.

**Ключові слова:** ТОНКОСТІННА АРМАТУРА, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ГУМОМЕТАЛЕВІ ВИРОБИ, МІЦНІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ ГУМИ З МЕТАЛОМ, ВУЛКАНІЗАЦІЯ.

**Аннотация.** В резинометаллических изделиях для объектов ракетно-космической техники, особенно с тонкостенной арматурой, таких как амортизаторы и кронштейны, практически всегда имеет место напругено-деформированное состояние (НДС) на границе «металл-адгезив-резина». Это связано с тем, что для обеспечения высокой прочности связи резины с металлом, металлическую арматуру прямолинейной или иной формы подвергают обязательной пескоструйной обработке дробью или электрокорундом зернистостью от 80 до 120 мкм потоком воздуха давлением 0,6-0,8 МПа. В процессе пескоструйной обработки на обрабатываемой поверхности возникает наклеп, что приводит к искривлению арматуры с выпуклостью навстречу обработке. Металлическая арматура после обработки, изменяя геометрическую форму, переходит в иное НДС, которое теперь для нее является равновесным.

Резинометаллические изделия, как правило, изготавливаются в пресс-формах под давлением методом горячей вулканизации резиновой смеси, одновременно соединяя ее с арматурой, на обработанную поверхность которой нанесена клеевая система. В процессе формования резиновой смеси в пресс-форме деформированная арматура под давлением выравнивается до первоначальной формы и временно удерживается в таком состоянии за счет адгезионной связи резины с металлом. Но после выемки резинометаллического изделия из пресс-формы в системе «металл-клеевая система-резина» возникает НДС, так как «выровненная» арматура стремится вернуться к своему равновесному состоянию. Учитывая релаксационные процессы, развивающиеся с течением времени, происходит расслоение между резиной и металлической арматурой, что делает такое изделие непригодным для эксплуатации.

Установлены зависимости прочности связи резины с металлом от деформации на стандартных образцах и предложены способы моделирования НДС, которые позволяют разрабатывать технологические процессы изготовления резинометаллических изделий с нулевым или минимальным НДС. В статье сформулированы основные подходы для снижения НДС в резинометаллических изделиях с тонкостенной арматурой и на конкретных изделиях показано, что снижение НДС позволяет обеспечить их работоспособность в течение всего гарантийного срока эксплуатации изделия.

**Ключевые слова:** ТОНКОСТЕННАЯ АРМАТУРА, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ, ПРОЧНОСТЬ СВЯЗИ РЕЗИНЫ С МЕТАЛЛОМ, ВУЛКАНИЗАЦИЯ.

**Abstract.** Stress and strain states are typical for rubber-to-metal bonding areas in the rubber-metal products developed specifically for the space industry, particularly those with thin-walled reinforcement, i.e. dampers and brackets. To achieve maximum rubber adhesion to metal, 80-120  $\mu\text{m}$  shot or aluminum oxide blasting at the air pressure of 0.6-0.8 MPa is applied to the reinforcing steel of straight or any other shape. The blasting process causes an improvement in the hardness of the material by strain hardening, which results in the backward deformation of the reinforcement. After the blasting process, the reinforcing steel changes its geometry and stress and strain state. A new equilibrium state appears.

Rubber-metal products are typically cast under pressure using press molds by vulcanizing a rubber mix at high temperatures. Bonding rubber to metal using an adhesive takes place simultaneously. During the molding process, the deformed reinforcement returns to its original shape once the pressure is applied and preserves its shape for some time due to strong rubber-to-metal bonds. Yet, after the rubber-metal product is taken out of the mold, the stress and strain state emerges in the rubber-to-metal bonding area, as the reinforcing steel wants to return to its equilibrium state. With the relaxation developing as time passes, delamination of the rubber-to-metal system occurs and the product can no longer be used.

As a result of our research, we determined the relationship between the strength of the rubber-to-metal adhesion and the deformation using standard samples and proposed the methods of the stress and strain state simulation that can be used for development of new technologies enabling manufacturing of rubber-metal products with no or small stress and strain levels. The paper outlines the key approaches to relieving the stress and strain states in the rubber-metal products with thin-walled reinforcement. Using the standard samples, we proved that relieving of the stress and strain state will ensure product operability during the entire period of warranty.

**Keywords:** THIN-WALLED REINFORCEMENT, STRESS AND STRAIN STATES, RUBBER-METAL PRODUCTS, STRENGTH OF THE RUBBER-TO-METAL ADHESION, VULCANISATION.

### **Вступ**

В об'єктах ракетно-космічної техніки (РКТ) і їх складових частинах використовується значна кількість армованих гумотехнічних виробів, зокрема гумометалевих виробів (ГМВ). Найчастіше вони використовуються в якості силових, амортизаційних, ущільнювальних і компенсуючих виробів або комплексного їх використання, тобто, в якості виробів багатофункціонального призначення. Враховуючи те, що ГМВ для вказаних об'єктів повинні мати мінімальну масу, в них, як правило, використовується тонкостінна металева арматура. Для надійного виконання вказаних функцій у ГМВ відповідної конструкції наряду з іншими вимогами повинна бути надійна міцність зв'язку гуми з металом, яка досягається комплексним підходом з урахуванням конструктивних, технологічних і експлуатаційних властивостей ГМВ у певному пристрої. На поточний момент одним із найбільш ефективних способів підвищення міцності зв'язку гуми з металом є кріплення гуми до завчасно підготовленої за спеціальною технологією металевої арматури в процесі формування гумової суміші під тиском і наступної гарячої вулканізації.

### **Постановка задачі**

Було помічено, що в ГМВ, особливо з тонкостінною арматурою, міцність зв'язку гуми з металом значно нижча, ніж на стандартних зразках. При цьому параметри міцності відрізнялися між найбільшим і найменшим значеннями більше, ніж у 2,5 рази з різним характером руйнування: адгезійним, когезійним або змішаним. В окремих випадках мало місце розшарування між арматурою та гумою після виготовлення і зберігання на протязі

певного часу на складі. Саме ці обставини і слугували основою для постановки відповідних досліджень напружено-деформованого стану (НДС) в ГМВ з тонкостінною металевою арматурою при їх виготовленні.

### **Експериментальна частина**

В якості об'єктів дослідження були вибрані натурні гумометалеві вироби, макетна арматура різних розмірів та конфігурації, яка аналогічна арматурі натурним виробам, і стандартні зразки за ГОСТ 209. Арматура натурних виробів товщиною 5 мм, шириною 100 мм і довжиною по зовнішньому діаметру дуги 510 мм виготовлялася із сталі 12X18H10T. Натурний зразок представляв собою реальний пластинчатий амортизатор з двома зовнішніми металевими пластинами, між якими закріплена методом пресування і вулканізації, гума (рис. 1). При виготовленні арматури враховувався напрямок прокатування листової сталі. Арматура стандартних зразків виготовлялася із конструкційних сталей 12X18H10T та сталі 20. Виготовлення об'єктів дослідження здійснювалось за типовим технологічним процесом, схема якого показана на рис. 2. Підготовка металевої арматури включає розвиток поверхні скріплювання (збільшення поверхні кріплення з гумою) піскоструминним способом, наприклад, електрокорундом відповідної зернистості. Як показує досвід, найкращий розвиток поверхні скріплювання арматури із конструкційних сталей із гумою досягається при зернистості електрокорунду від 80 до 120 мкм, який подається потоком повітря під тиском від 0,6 до 0,8 МПа. Розвиток поверхні скріплювання з гумою здійснювали до еталонного стану.



Рисунок 1 – Загальний вигляд пластинчатого амортизатора

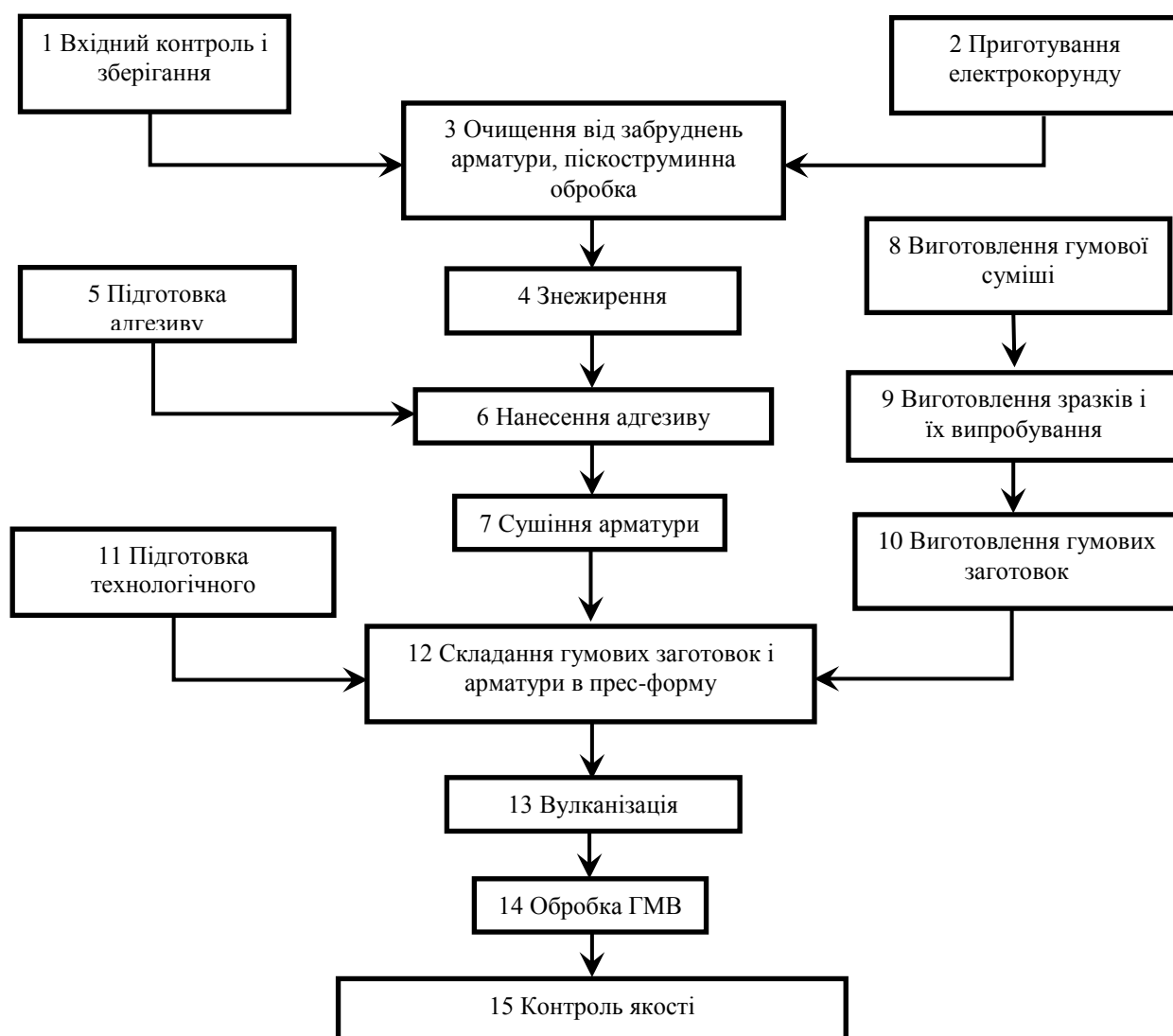


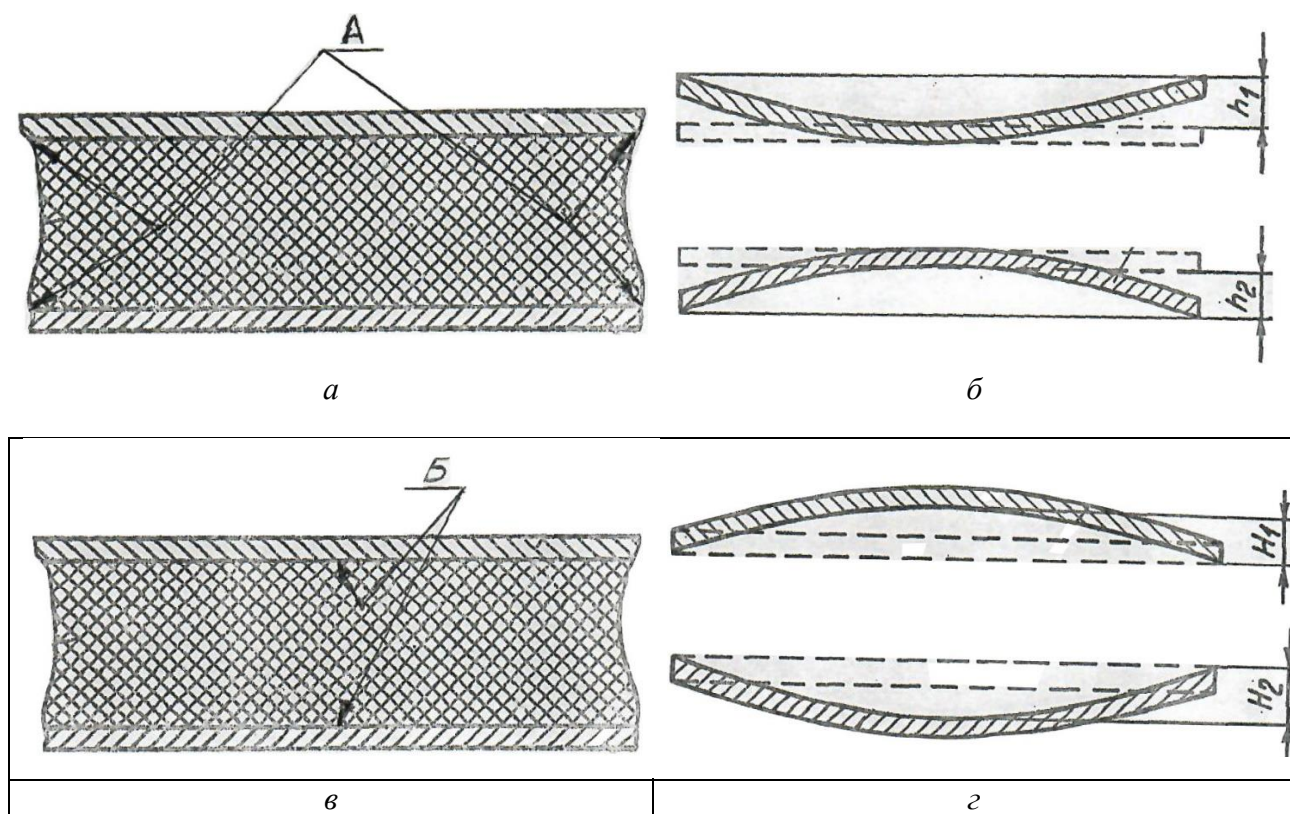
Рисунок 2 – Технологічна схема виготовлення гумометалевих виробів

В процесі піскоструминної обробки на вказаній поверхні виникає наклеп, що призводить до дугоподібної деформації арматури з випуклістю в зворотному напрямку дії піскоструминного потоку (рис. 3). Арматура тепер переходить в інший

стан, який для неї стає рівноважним. В процесі вулканізації під тиском zdeформована арматура вирівнюється до початкових розмірів, тобто, деформація тимчасово зникає за рахунок адгезійного зв'язку гуми з металом. Але в системі

«метал-адгезив-гума» виникає НДС, так як «виправлена» арматура намагається повернутися до рівноважного стану, що з терміном часу, враховуючи релаксаційні процеси в зазначеній системі, призводить до розшарування між арматурою і гумою в зоні А (рис. 3а), саме в тій зоні, в якій має місце найбільший прогин арматури  $h_1$  та  $h_2$  (рис. 3б). При цьому з'ясувалося, якщо обернену сторону арматури обробити піскоструминним способом за аналогічним режимом, її прогин значно зменшується, але повністю вирівняти арматуру таким чином не вдавалось. Ділянки в зоні А розташовані ззовні ГМВ та відкриті для взаємодії з чинниками зовнішнього середовища [1, с.569] та прискореного старіння, яке

активується НДС залишкової деформації. При зміні порядку обробки поверхонь: спочатку зовнішніх, а потім поверхонь скріплювання з гумою мав місце прогин  $H_1$  та  $H_2$ , відповідно, який алогічний першому випадку. Але залишкова деформація переміщується в зону Б (рис. 3в,г) і тепер знаходиться всередині ГМВ, яка має менший зовнішній вплив атмосферних чинників і механічних проявів, так як більш захищена масивом гуми. Після односторонньої піскоструминної обробки поверхні арматури зі сторони скріплювання стріла прогину  $h_1=h_2$  складала 32-34 мм, тоді як після аналогічної обробки з зовнішньої сторони вона зменшилася до 3,4-3,6 мм.



**Рисунок 3 – Схема напружено-деформованого стану пластинчатого амортизатора при різних схемах піскоструминної обробки:**

а – зовнішній вид пластинчатого амортизатора після вулканізації з піскоструминною обробкою арматури зі сторони скріплювання. Зона А – місця найбільших деформацій та виникнення тріщин і розшарувань;  
б – зовнішній вид комплекту арматури пластинчатого амортизатора після його піскоструминної обробки зі сторони скріплювання;  
в – зовнішній вид пластинчатого амортизатора після вулканізації з піскоструминною обробкою арматури спочатку з зовнішньої сторони, а потім зі сторони скріплювання. Зона Б – місця найбільших деформацій;  
г – зовнішній вид комплекту арматури пластинчатого амортизатора обробленого піскоструминним способом з зовнішньої сторони перед аналогічною обробкою зі сторони скріплювання.

Для з'ясування впливу НДС в системі «метал-адгезив-гума» ГМВ використали стандартний метод випробування міцності зв'язку гуми з металом за ГОСТ 209 [2] з імітуванням на стандартизованих зразках НДС за величиною деформації арматури в ГМВ. На рис. 4 показана схема моделювання впливу деформації арматури на міцність зв'язку гуми з металом при різних величині деформації, за удосконаленим способом [3].

Він полягає в тому, що стандартизований зразок, що містить два однакових металевих диска, до яких методом гарячої вулканізації прикріплено гумовий шар відповідної товщини, вулканізують в прес-формі за режимом

вулканізації майбутнього ГМВ, в якому необхідно визначити (спрогнозувати) міцність адгезивного зв'язку гуми з металом, та виймають із прес-форми. Не охолоджуючи зразок, вимірюють товщину гумового шару  $H$  у вільному нерозтягнутому стані при якому деформація  $\varepsilon = 0$ . За характеристику початкового стану зразка приймається відстань між центрами отворів  $A$  у металевих дисках, а температура зразка дорівнює температурі вулканізації  $T_B$ . Тобто, в початковому стані зразок повинен мати наступні параметри:  $\varepsilon = 0$ ;  $A = A_0$ ;  $T = T_B$  (рис. 4а).

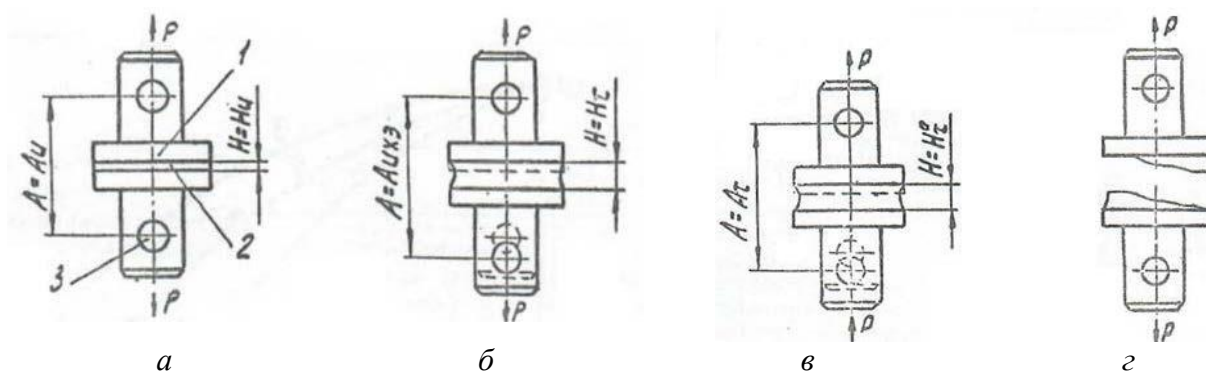


Рисунок 4 – Схема моделювання напружено-деформованого стану з використанням стандартизованих зразків:

1 – металевий диск, 2 – гумовий шар, 3 – отвір для кріплення

Потім зразок розтягують у спеціальному пристрої до заданої величини деформації, що імітує реальний прогин арматури ГМВ після піскоструминної обробки. В залежності від поставленої задачі задана величина деформації може бути або максимальною, або розподілена від нуля до максимального значення з певним шагом. З метою виключення значної похибки спеціальний пристрій попередньо нагрівається до температури вулканізації. При заданій величині деформації зразок фіксують з новими параметрами:  $\varepsilon = \varepsilon_1$ ;  $A = A_1$ ;  $T_1 = T_B$  (рисунк 4б). В такому стані зразок охолоджують (кондиціонують) до певної температури, при якій будуть здійснюватися випробування (рисунк 4в). Такою температурою може бути кімнатна

температура  $(18-22)^\circ\text{C}$  або інша температура, наприклад, температура експлуатації в межах роботоzдатності ГМВ. Після кондиціонування зразок звільняють від розтягувальних деформацій і після повторного кондиціонування до досягнення зразком рівноважного стану його піддають випробуванням до руйнування, визначаючи міцність адгезивного зв'язку гуми з металом (рисунк 4г). Контроль деформації здійснювали за поточною товщиною гумового шару в зразках при його розтягуванні  $H_{\Pi}$  на задану величину від  $H_{\Pi} = H_{\Pi 1}$  до найбільшого значення  $H_{\Pi} = h_1$  або  $H_{\Pi} = h_2$ , яка визначалась за формулою:

$$\varepsilon = [(H_{\Pi} - H_0)/H_{\Pi}] \times 100\%. \quad (1)$$



Розтягування гумового шару здійснювали шляхом збільшення міжцентрової відстані між кріпильними отворами в металевих дисках зразків  $A_0$  до руйнування силою  $P$  по площині  $F_{гш}$ . При цьому, руйнування зразків мало місце при різному подовженні в залежності від марки гуми.

Як видно із залежності міцності зв'язку  $\sigma$  гуми з металом від деформації  $\varepsilon$  (рис. 5), яку визначали за формулою (2),

$$\sigma = \frac{P}{F_{гш}} \quad (2)$$

для всіх гум деформація на границі «метал-адгезив-гума», що викликана НДС в результаті наклепу від піскоструминної обробки і намагання повернутися до рівноважного стану, є визначальною. В усіх випадках зі збільшенням НДС спостерігається зниження міцності зв'язку гуми з металом. Слід зазначити, що майже у всіх випадках спостерігалось адгезивне руйнування, тобто по клейовій плівці. Останнє може свідчити про залежність міцності зв'язку гуми з металом не лише від величини деформації на границі «метал-адгезив-гума», а і від режиму вулканізації зразків, що імітує режим вулканізації ГМВ.

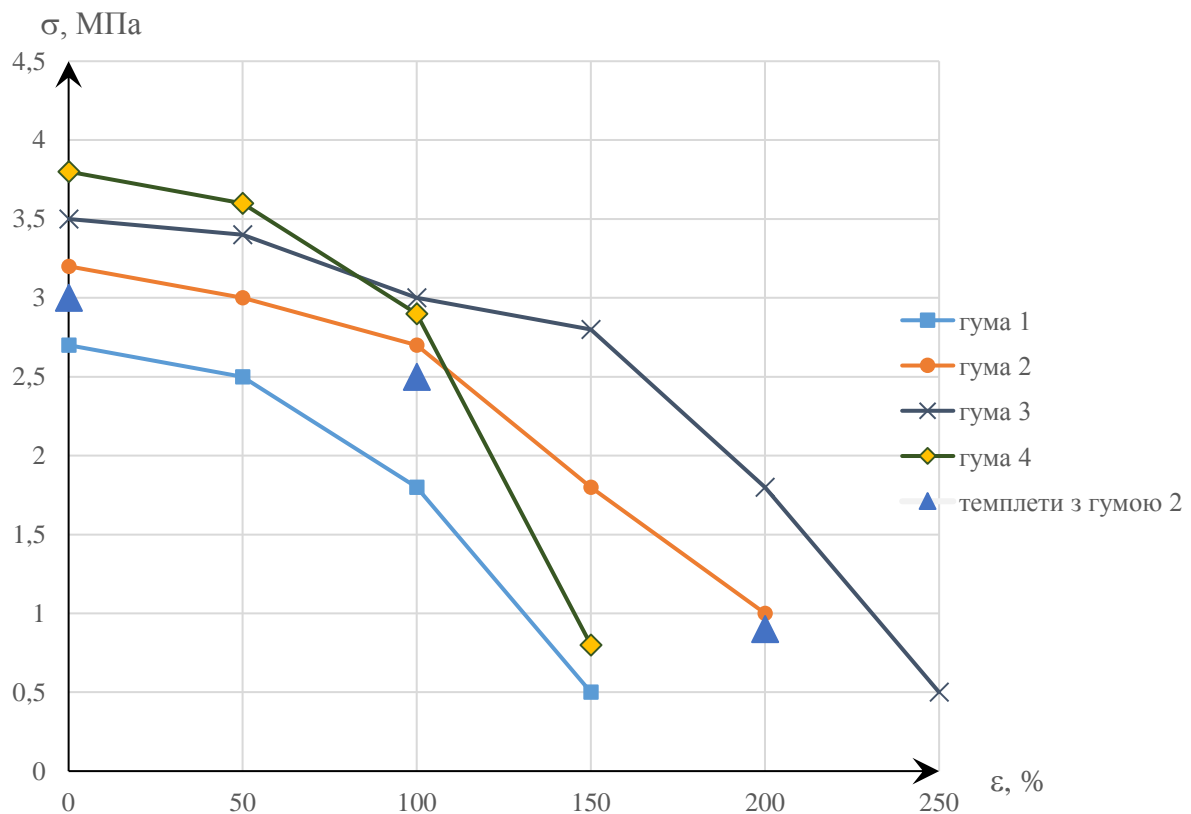


Рисунок 5 – Залежність міцності зв'язку гуми з металом від деформації

Слід також зазначити, що із натурних зразків з гумою 2 були виготовлені темплети та проведені випробування. Як видно із рисунку 5 міцність зв'язку гуми з металом в темплеті приблизно на 10% нижча, ніж на зразках, що очевидно пов'язано з механічним впливом при їх виготовленні та точності вимірювання прогину арматури на зразках. Але для гуми,

яка є багатокомпонентною композиційною системою, це достатня кореляція щодо принципу прогнозування міцності адгезивного зв'язку гуми з металом в ГМВ за результатами випробувань на зразках зазначеним способом.

Використовуючи отримані результати наведених досліджень, натурні вироби виготовлялися за типовим технологічним процесом (рис. 2) з

арматурою, обробка яких здійснювалася з двох сторін: спочатку піскоструминній обробці піддавались зовнішні поверхні, а потім – внутрішні поверхні скріплювання. Як показали подальші результати експлуатації, натурні вироби забезпечили задану роботоздатність в об'єктах РКТ.

Таким чином, розрахувавши теоретично прогин арматури в заданій зоні або визначивши його експериментально, можна по отриманим залежностям прогнозувати міцність зв'язку гуми з металом в конкретних ГМВ на будь-якій його ділянці на відміну від відомого способу за ГОСТ 209, відповідно до якого можна визначити лише потенційні можливості гум та адгезивів забезпечення заданої міцності до арматури відповідних металів.

### **Висновки**

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

Досліджено НДС в гумометалевих виробах з тонкостінною арматурою на границі «метал-адгезив-гума»,,. Отримані залежності міцності зв'язку гуми з металом на спеціальних зразках від величини деформації, що імітують НДС в реальних ГМВ.

Установлено, що зі збільшенням деформації тонкостінної арматури після піскоструминної обробки суттєво знижується міцність адгезивного зв'язку гуми з металом у ГМВ.

Показано вплив конструктивних і технологічних чинників на міцність адгезивного зв'язку гуми з металом у ГМВ з тонкостінною арматурою. Установлено, що тонкостінна арматура в результаті наклепу на її поверхні деформується з випуклістю в напрямку зворотному напрямку дії струменя.

Запропоновано спосіб прогнозування міцності адгезивного зв'язку гуми з металом у ГМВ.

### **Бібліографічні посилання**

1. Большой справочник резинщика. В двух частях. Ч. 1. Каучуки и ингредиенты /

Под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова.- М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 744 с..

2 ГОСТ 209. Резина и клей. Методы определения прочности связи с металлом при отрыве. 1989.

3 А.С.№1341587 СССР, МКИ G01 N33/44. Способ определения прочности клеевого соединения резины с металлом / Хорольский М.С., Балашов А.П.; Опубл. 30.09.87. Бюл. №36.

*Надійшла до редколегії 10.07.2019 р.*

### **Відомості про авторів**



Хорольський Михайло Степанович, Україна Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара. Доцент кафедри технології виробництва, кандидат технічних наук, Сфера інтересів – технологія виробництва РКТ.



Санін Анатолій Федорович, Україна Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара. Завідувач кафедри технології виробництва, доктор технічних наук, професор. Сфера інтересів – технологія виробництва РКТ