

УДК 620.18

*А.Е. БАРМИН*, стажер преподаватель НТУ "ХПИ"

**ПОЛУЧЕНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ (СМК) И  
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ (НК) МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ В ВАКУУМЕ  
(PVD)**

Рассматривается возможность получения методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме материалов в виде фольг и покрытий с субмикроструктурной и нанокристаллической структурой. Приведены результаты электронномикроскопических исследований и механических испытаний конденсатов на основе Fe и Cu. Исследовано влияние технологических условий получения на структуру этих материалов.

Possibility of reception by a method of electron beam evaporation and condensation in vacuum of materials in the form of foils and coatings with submicrocrystalline and nanocrystalline structure is considered. Results electronic microscopic researches and mechanical tests of condensates on the basis of Fe and Cu are resulted. The influence of technological conditions on the structure of these materials are researched. The influence of technological conditions on the structure of these materials are resulted.

К настоящему времени в наш лексикон очень прочно вошли такие понятия, как наноструктура, наноматериал, нанотехнология. Так что же такое наноматериал?

Наиболее общее понятие следующее: Наноматериалы – это материалы, в которых один или несколько структурных параметров (зерно, химическая неоднородность, толщина слоя в многослойных покрытиях и т.д.) имеют размер менее 100 нм. Однако следует отметить что 100 нм это условный верхний предел, который обусловлен тем что для большинства физических явлений характерный размер лежит в интервале 10-100нм, но для некоторых физических явлений он может быть повышен до 1 мкм.

Другими словами, материал переходит в наноструктурное состояние, когда происходит качественное изменение в зависимости физико-механических свойств от размера структурных параметров.

На сегодня разработано достаточно большое количество методик получения наноматериалов, в таблице представлены основные методы получения [1,2].

В основе всех этих методов лежат два противоположных подхода: создание материалов «снизу-вверх» и «сверху-вниз». К одним из методов создания нанокристаллических и субмикроструктурных материалов «снизу-вверх» относится метод испарения и конденсации в вакууме (PVD).

PVD технология выгодно отличаются от других методов получения материалов и покрытий практически неограниченными возможностями в управлении структурой и свойствами. С помощью испарения и конденсации можно получать металлические, керамические и керамико-металлические материалы и покрытия с заданной структурой.

Известно [3-5], что на структуру конденсатов и соответственно на их свойства влияют многие факторы, главные из них: температура подложки, природа сил связи испаряемого материала, наличие примесей, скорость конденсации и т.д. Наиболее сильным фактором из перечисленных выше, влияющих на структуру и свойства, является - температура подложки.

## Основные методы получения наноматериалов

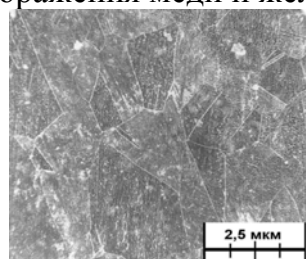
Основные методы получения наноматериалов		
Группа	Основные разновидности	Объекты
Порошковая технология	Метод Глейтера (газофазное осаждение и компактирование) Электроразрядное спекание Горячая обработка давлением Высокие статистические и динамические давления при обычных и высоких температурах	Металлы, сплавы, химические соединения
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование Деформация кручением Обработка давлением многослойных композитов Фазовый наклеп	Металлы, сплавы
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Обычные и высокие давления	Аморфные вещества
Пленочная технология	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) Физическое осаждение из газовой фазы (PVD) Электроосаждение Золь-гель технология	Элементы, сплавы, химические соединения

Накопленный на сегодня материал по изучению структуры и физико-механических свойств материалов вакуумного происхождения относится в основном к объектам с размером зерна значительно больше 100 нм. А что касается информации о структуре и свойствах нанокристаллических композиционных материалов типа металл-металл вакуумного происхождения, то она практически отсутствует. В связи с этим перед данной работой ставились следующие задачи:

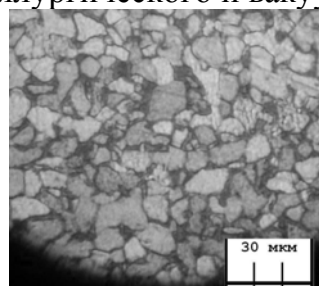
- 1) Исследовать корреляцию зеренной структуры и механических свойств конденсатов Cu и Fe в зависимости от технологических параметров получения.
- 2) Изучить влияние легирования на диспергирование зеренной структуры конденсатов.

Материалом исследования служили фольги Cu, Fe, Cu-W, которые были получены методом PVD. Структурные исследования проводились методом электронной микроскопии. Оценка механических свойств производилась измерением микротвердости и испытанием на активное растяжение.

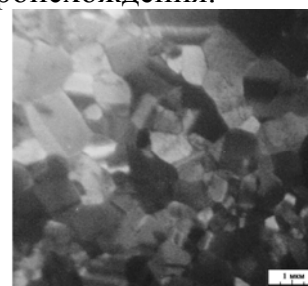
На рис.1 представлены металлографические и электронно-микроскопические изображения меди и железа металлургического и вакуумного происхождения.



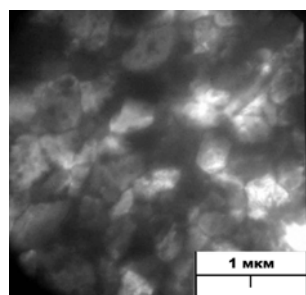
а) Cu металлургического происхождения



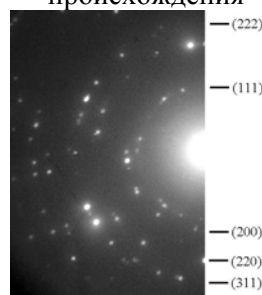
Fe металлургического происхождения



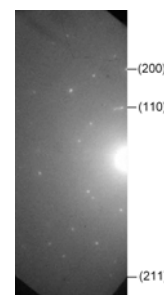
б) Cu вакуумного происхождения



Fe вакуумного происхождения



в) электронограмма Cu вакуумного происхождения



электронограмма Fe вакуумного происхождения

Рис. 1 Структура меди и железа

Видно, что характер структурного состояния этих объектов практически одинаковый – полиэдрическая форма зерен с узкими границами. Но размер зерна в образцах вакуумного происхождения значительно меньше. На электронограммах посторонних рефлексов не было обнаружено.

На рисунке 2 представлены зависимости влияния технологических условий получения на структуру и свойства вакуумных конденсатов.

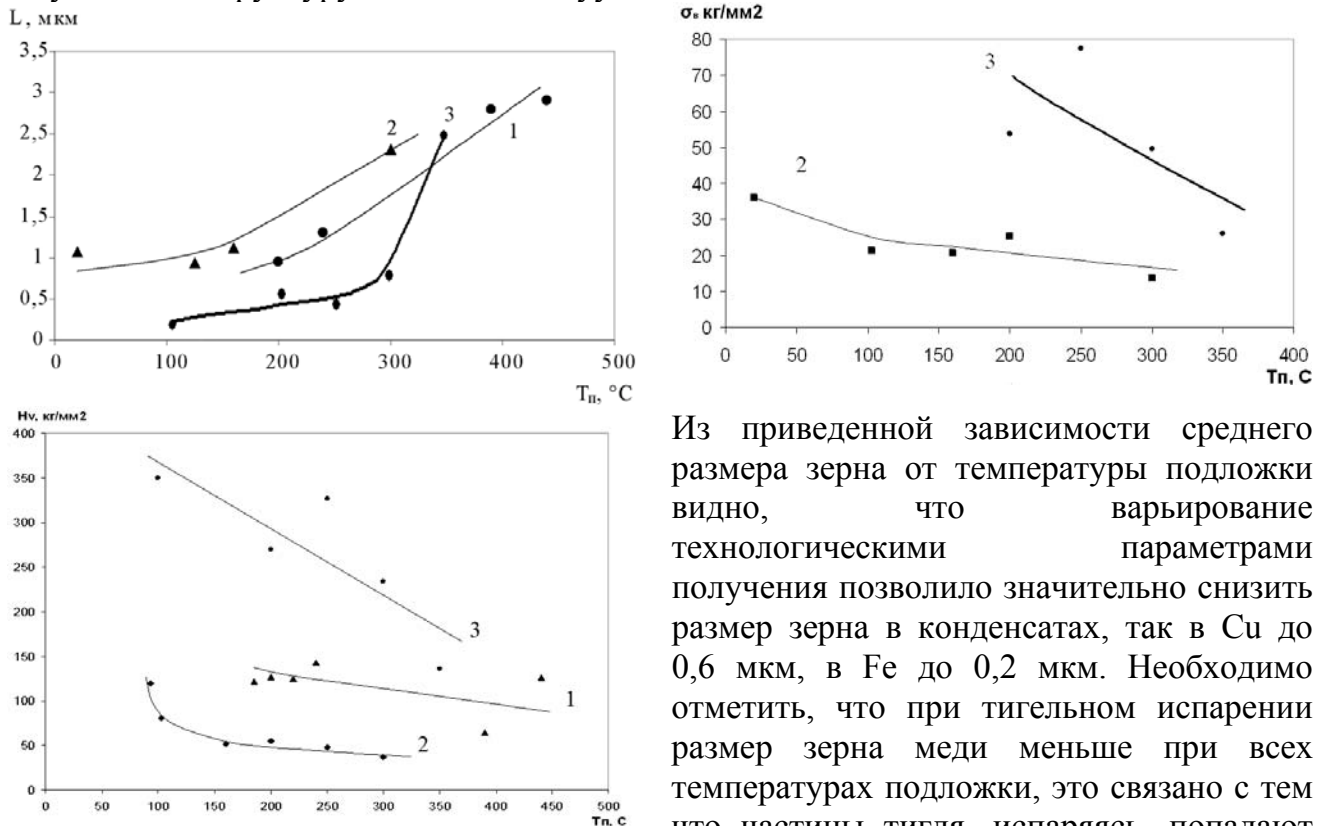


Рис. 2 Влияния технологических условий получения на структуру и свойства вакуумных конденсатов ( 1 - Cu(тиг. исп.), 2 - Cu(эл.луч. исп.), 3 - Fe (эл.луч. исп.) )

конденсации так и в процессе рекристаллизации [6].

Важным результатом является тенденция к замедлению диспергирования структуры при снижении температуры подложки меньше  $\sim 100^\circ\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что становится проблематичным достижения нанометровой размерности зеренной структуры путем изменения температуры подложки.

Прочностные свойства, согласно приведенным данным возрастают при снижении температуры подложки, так для меди предел прочности возрастает от 14 до  $36 \text{ kg}/\text{mm}^2$ , для железа от 26-78  $\text{kg}/\text{mm}^2$ . Повышенные значения прочностных свойств конденсатов полученных испарением из тигля, также связаны с легированием конденсатов частицами материала тигля [7].

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что для дальнейшего значительного повышения прочностных свойств чистых меди и железа недостаточно снижать температуру подложки. Выявленное повышение прочности конденсатов при их микролегировании материалом тигля указывает на возможность улучшения физико-механических свойств конденсатов путем синтеза композиционных структур.

Известно, что эффективным способом управления зеренной структурой является модифицирование, т.е. введение в расплав присадок - модификаторов, которые являются дополнительными центрами кристаллизации.

Для вакуумных конденсатов подобное явление наблюдается при конденсации двух- или многокомпонентного пара (основной материал играет роль матрицы, легирующий элемент - модификатор).

В данной работе изучено влияние легирования меди вольфрамом, на зеренную структуру и прочные свойства вакуумных конденсатов. На рис. 3 представлена равновесная диаграмма состояния системы Cu-W, которая свидетельствует о невозможности получения сплава этих элементов металлургическими методами.

Вместе с тем литературные данные, свидетельствуют о возможности синтеза таких сплавов при конденсации смесей их паров в вакууме [5].

На рис. 4 представлены электронно-микроскопические изображения конденсата бинарной системы Cu-W.

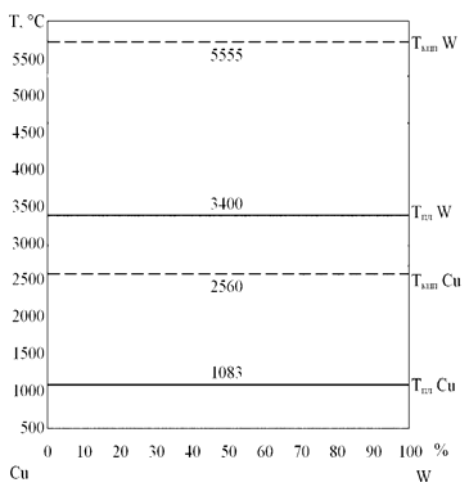
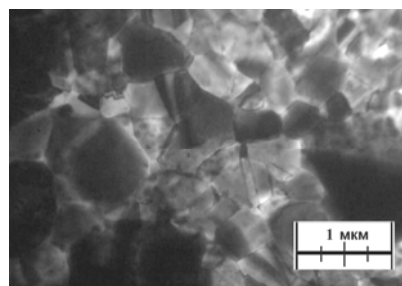


Рис. 3 Равновесная диаграмма состояния системы Cu-W

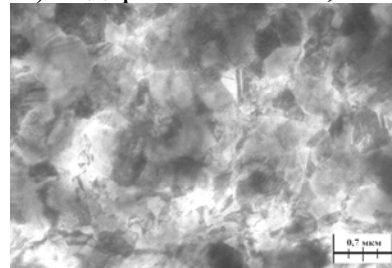
Сравнение этих данных с рисунком 1 показывает, что зеренная структура бинарных систем при малых концентрациях легирующих компонентов (~ 0,1-0,2 вес.%) существенно не изменяется по сравнению с конденсатом чистой меди, но при этом снижается величина зерна. Однако увеличение содержания легирующих элементов кардинально меняет зеренную структуру: форма зерен становится округлой, межзеренные границы размыты и практически не заметны.

На электронограммах увеличивается плотность рефлексов на дифракционных линиях, принадлежащих меди, а также появляются рефлексы вольфрама.

Таким образом, легирование меди приводит к кардинальному изменению ее структурного состояния, резкого снижения размера зерна, формирования частиц W в объеме медной матрицы, а также образованию аномальных растворов легирующих элементов в ГЦК-решетке меди [6]. Следствием таких процессов является резкое повышение прочностных свойств материала, что подтверждается на концентрационных зависимостях (рис. 5).



а) содержание W ~ 0,2 %



б) содержание W ~ 1,0 %

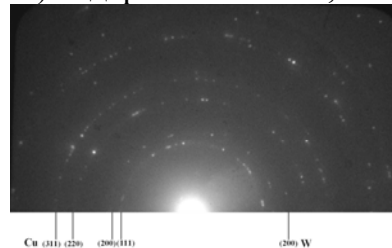


Рис. 4 – Электронно-микроскопическое изображение и электронограмма конденсата Cu-W

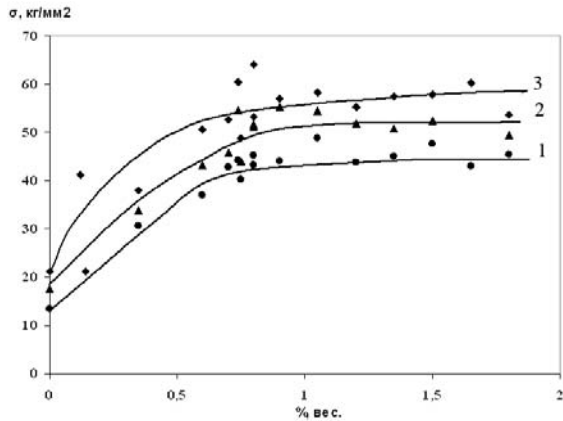


Рис. 5 – Концентрационные зависимости 1)  $\sigma_0$ , 2)  $\sigma_{0,2}$ , 3)  $\sigma_b$  для конденсатов системы Cu – W

При малых концентрациях легирующих элементов, примерно до 0,5 вес. %, наблюдается интенсивный рост свойств, затем наклон кривых меняется и при содержании W 1,0% концентрационные кривые выходят на насыщение. Дальнейшее увеличение концентрации легирующих элементов не приводит к росту прочностных свойств.

Для описания зависимости прочностных характеристик от размера зерна используют

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + K_\sigma L^{-1/2}; H = H_0 + K_H L^{-1/2}$$

где  $K_\sigma$  и  $K_H$  — коэффициенты ХП;

$\sigma_0$  и  $H_0$  — соответствуют пределу текучести и твердости монокристалла

Величина коэффициента ХП зависит от типа материала, его чистоты, температуры испытания, среднего размера зерна, дефектности структуры и состояния границ зерен. На рис. 6 представлены зависимости ХП для фольг Cu, Fe, Cu-W.

Таблица 2

Значения коэффициента  $k(\text{МПа} \cdot \sqrt{м})$

Объект	$H_v$	$\sigma_0$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$
Cu (металлург.)	—	0,1	0,11	0,11
Cu (тигельная)	0,79	0,11	0,1	0,1
Cu (ел. – луч.)	—	0,11	—	—
Cu-W	2,32	0,37	—	0,41
Fe (металлург.)	—	—	—	0,19
Fe (ел. - луч)	1,68	—	—	0,18

Из таблицы видно, что для  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $H_v$ , значение коэффициента ХП для практически одинаковы между собой и практически совпадают с литературными данными [8] как для меди и так для железа.

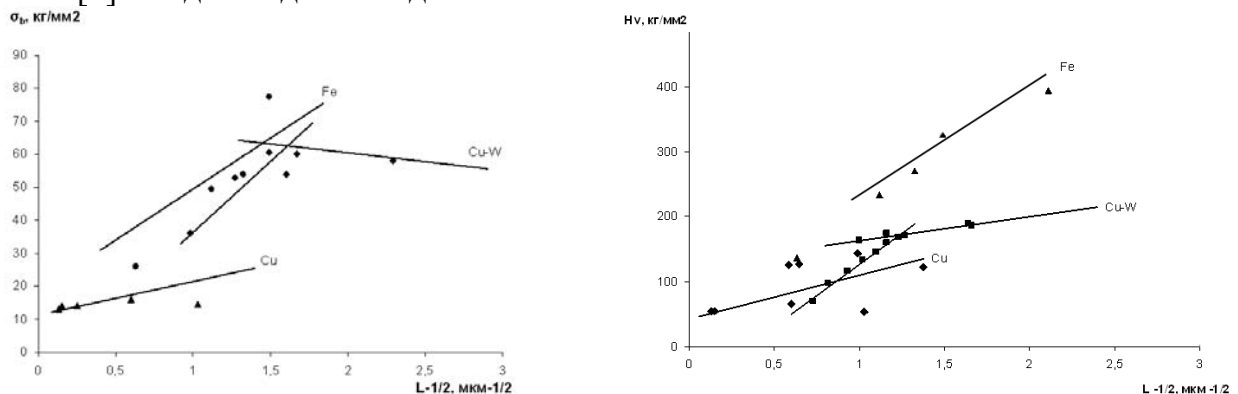


Рис. 6 – Влияние зеренной структуры на прочностные свойства

Этот важный экспериментальный результат свидетельствует, во-первых, о том, что конденсаты, которые изучаются, в структурном плане аналогичны массивным материалам. Во-вторых, совпадение свидетельствует об одинаковом механизме деформации в субмикроструктурном и массивном состоянии.



Легирование меди вольфрамом приводит к существенным изменениям характера зависимости ХП, которое показано на рис. 6. Видно, что их наклон, а значит и значение коэффициента  $k$  (таблица 2) существенно возрастают по сравнению с медью в несколько раз, что свидетельствует об изменении деформационного поведения легированной фольги.

Важным экспериментальным результатом является выявление перегибов на экспериментальных зависимостях ХП. Это явление, известно для массивных материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации, принято связывать с переходом в наноструктурное состояние и соответственно с изменением механизма пластической деформации.

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Выявлено, что для достижения нанометровой размерности зеренной структуры конденсата чистых металлов необходимо снижать температуру подложки ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , что является технологически неоправданным.

2) Показано, что наиболее эффективным средством диспергирования зеренной структуры, а также методом увеличения прочностных свойств конденсата меди является легирование нерастворимыми в ней тугоплавкими металлами (W).

3) Характер зернограничного упрочнения в фольгах Fe, Cu, описывается уравнением Холла-Петча.

4) Легирование меди W приводит к увеличению значения коэффициента  $k$  в уравнения Холла-Петча.

5) Для конденсата системы Cu-W, определенные структурные границы перехода в нанокристаллическое состояние.

Автор выражает благодарность за оказанное содействие и ценные советы д. ф.-м. н., проф. Ильинскому А.И. и к. ф.-м. н., доц. Зубкову А.И.

**Список литературы:** 1. Носкова Н. И., Мулюков Р. Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: Уро РАН, 2003. 279 с. 2. Андриевский Р. А. // Наноматериалы: концепция и современные проблемы. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И.Менделеева), 2002, т. XLVI, №5, с 50. 3. Ильинский А.И. Структура и прочность слоистых и дисперсноупрочненных пленок.- М.: Металлургия, 1986. 4. Мовчан Б.А., Демчишин А.В. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония – Физика металлов и металловедение, 1969 №4, с 653. 5. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждения в вакууме.- Киев: Наукова думка, 1983. 6. Зубков А.И., Ильинский А.И. Особенности структуры и упрочнения быстрозакаленных дисперсно-упрочненных сплавов из взаимноне-растворимых компонентов // Сплавы с эффектом памяти формы и другие перспективные материалы. – С-П.: 2001, – с. 238-245. 7. Ильинский А.И., Лях Г.Е. Методы механических испытаний пленок и фольг // Зав.лаборатория, т.44, №2, 1978. –1507–1511 с. 8. Козлов Э.В. Механизмы деформации и упрочнение поликристаллов с нанозернами. Проблема Холла-Петча // III международная школа-конференция «Физическое материаловедение», – Томск: ТГСУ, 52 с.

*Поступила в редколлегия 16.05.2009*

УДК 629.113 + 59.001.4

**В.В. ВОЛОЩУК**, УкрНДІгаз, м. Харків,

**М.О. ВОЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук, КДТУ, м. Краснодар, Росія

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ПАР ТЕРТЯ БАРАБАННИХ ГАЛЬМ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Представлені результати експериментальних досліджень теплових процесів, що відбуваються в барабанних гальмах автотранспортних засобів, при природному і примусовому їх охолодженні

на типових режимах випробувань. Представлені об'єкти і методика проведення досліджень, а також необхідне обладнання.

Results of experimental investigations of the thermal processes occurring in drum-type brakes with natural and forced cooling on typical modes of tests are presented. Objects and a technique of carrying out of investigations also as required equipment are presented.

Тепловий стан окремих механізмів, що працюють за умови підвищених робочих навантажень, є визначальним фактором при розробці конструкції, базових параметрів, матеріалів. Це безпосередньо стосується автомобільних барабанних гальм, теплова навантаженість яких є значною і їх працездатність обмежена певним діапазоном температур [1].

Дослідженню теплового стану барабанних гальм автомобілів присвячено роботи [2-3 та ін.].

При випробовуванні гальм ГАЗ-53А та ЗиЛ-130 при тривалому режимі гальмування (дорога Ош-Хорог на Памірі) поверхневі температури задніх гальмових механізмів досягали 300-400 °С та 250-300 °С відповідно [2]. При повторно-короткочасному гальмуванні гальм автомобіля ЗиЛ-130 в міських умовах поверхнева температура досягала 210 °С, а при тривалому гальмуванні в гірських умовах Криму – 200-300 °С [3]. В результаті згаданих випробувань було виявлено інтенсивне зношення фрикційних пар гальм.

При вказаних вище температурах спостерігається зниження коефіцієнту тертя, а отже і ефективності гальмування. Тому тепловий стан барабанних гальм та шляхи його зниження потребують детального дослідження. Слід зазначити, що дослідження на типових режимах дозволяють об'єктивніше оцінити тепловий стан та енергоємність гальм

Метою даної статті є експериментальні дослідження теплових процесів, що відбуваються в барабанних гальмах автотранспортних засобів, при природному і примусовому їх охолодженні на типових режимах випробувань.

У відповідності з метою, задачами досліджень є: оцінка теплонавантаженості пар тертя барабанних гальм автотранспортних засобів при їх природному та примусовому охолодженні на типових режимах випробування; встановлення впливу величини вхідних параметрів на теплонавантаженість пар тертя гальм; оцінка довговічності пар тертя барабанних гальм з примусовим охолодженням.

**Об'єкти експериментальних досліджень.** В ролі об'єкту дослідження взято пари тертя задніх колісних барабанних гальм вантажного автомобіля ЗИЛ з повною масою 11 т (серійні та з вмонтованими на них пристроями для зниження теплонавантаження за допомогою ефекту теплової труби).

Для підвищення енергоємності пар тертя барабанно-колодкових гальм автотранспортних засобів було розроблено пристрій [4], конструкція якого дозволила ефективно використати внутрішній об'єм гальмового механізму, кондуктивний вид теплообміну та ефект «теплової труби».

Більш детально зовнішній вигляд фрагменту пристрою для інтенсифікації охолодження барабанних гальм можна побачити на рис. 1.

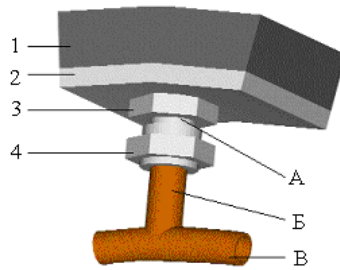


Рис. 1. Фрагмент пристрою для зниження теплонавантаженості барабанних гальм автотранспортних засобів: 1- фрикційна накладка; 2 – гальмова колодка; 3 – фіксуюча гайка; 4 – штуцер; 5 - теплова труба; А, Б, В – зони теплової труби: випаровування, транспорту та конденсації

Загалом розглядалися чотири варіанти виконання об'єкту дослідження (табл. 1), щоб виявити ефективне виконання для кожного з режимів випробувань.

Таблиця 1

**Класифікація варіантів виконання об'єкту дослідження**

Варіант виконання	Короткий опис варіанту виконання об'єкту дослідження
I-ий	Серійна пара тертя з природним охолодженням
II-ий	Пара тертя з вмонтованим на гальмовій колодці пристроєм для інтенсифікації охолодження типу „теплова трубка” (8 малих теплових труб з оребренням на кожній гальмовій колодці)
III-ий	Пара тертя з вмонтованим на гальмовій колодці пристроєм для інтенсифікації охолодження типу „теплова трубка” (2 теплові труби без оребрення з 16 секціями зони нагрівання на кожній гальмовій колодці)
IV-ий	Пара тертя з вмонтованим на гальмовій колодці пристроєм для інтенсифікації охолодження типу „теплова трубка” (2 теплові труби з оребренням та з 16 секціями зони нагрівання на кожній гальмовій колодці)

Другий та третій варіанти виконання пар тертя задніх колісних барабанних гальм автомобіля з вмонтованими на них пристроями для примусового охолодження показані на рис. 2 та 3.

**Вимоги до умов проведення експериментальних досліджень:** умови і методика експериментальних досліджень відповідають вимогам ДСТУ UN/ECE R 13-09:2002 [5]; засоби вимірювань, що застосовуються при експериментальних дослідженнях були перевірені за ДСТУ 2708-94; роботи проводились відповідно до вимог технічної та пожежної безпеки; при проведенні дорожніх випробувань до технічного стану вузлів та агрегатів автотранспортних засобів висуваються певні умови, а також вимоги до профілю, довжини, стану покриття дороги та метеорологічним умовам, узгодженні з нормами ДСТУ 3649-97 та [5].

Відповідно до норм, дорожні експериментальні дослідження проводились на ділянці маршруту Харків - Красноград на вантажному автомобілі ЗИЛ з повною масою 11 т. Циклічні випробування виконувались автомобілем згідно [5]. Крім того, проводились випробування типу: I (2,5 хвилин) шляхом буксирування по горизонтальній ділянці дороги загальмованого автотранспортного засобу при допомозі спеціального автомобіля-тягача протягом двох з половиною хвилин зі швидкістю 30 км/год з тяговим зусиллям в зчпному пристрої  $0,107 gM_a$ ; II (12 хвилин) шляхом буксирування зі швидкістю 30 км/год по горизонтальній ділянці довжиною 6 км



загальмованого автомобільного засобу при допомозі спеціального автомобіля-тягача з тяговим зусиллям в зчіпному пристрої  $0,06 gM_a$ .

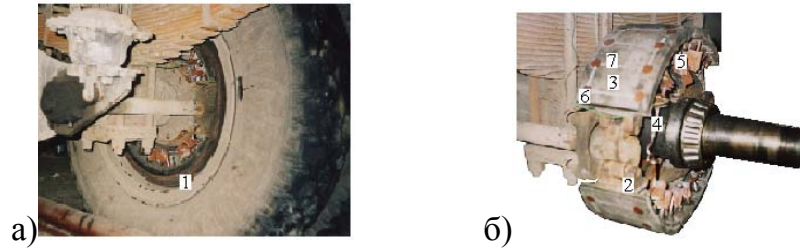


Рис. 2 а,б Другий варіант виконання об'єкту дослідження в зборі (а) та без гальмівного барабану (б): 1 – гальмовий барабан; 2 – гальмова колодка; 3 – фрикційна накладка; 4 – теплова труба; 5 – ребро зони охолодження; 6 – теплопровідна вставка ; 7 – теплознімальна пластина.

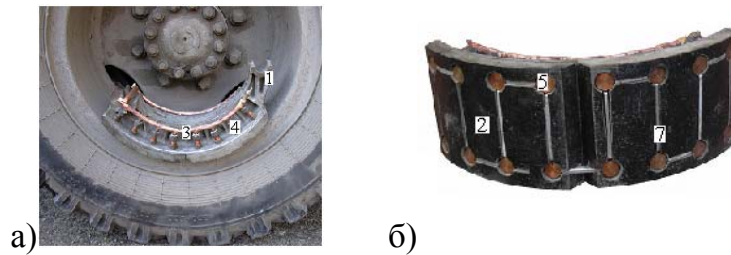


Рис. 3 а,б Третій варіант виконання об'єкту дослідження: переобладнана гальмівна колодка на ободі колеса (а) та її вигляд зі сторони накладок (б); 1 – гальмова колодка; 2 – фрикційна накладка; 3 – теплова труба; 4 – секція зони нагрівання; 5 – теплопровідна вставка ; 6 – теплознімальна пластина.

**Стенд для випробовування барабанних гальм.** З огляду на необхідність здійснення великої кількості випробувань на різних режимах гальмування стенд повинен мати властивості, які дозволяють здійснювати гальмування, відповідні до випробовувань типу I та II.

При цьому реєстрації та розрахунку підлягали наступні параметри: час гальмування; кутова швидкість гальмівного барабану; температури характерних точок деталей пар тертя гальма; гальмівний момент, що створюється механізмом.

У відповідності з цими умовами був створений стенд (рис. 4), основні деталі, якого кріпляться на рамі (дві балки двотаврового перерізу з поперечними перегородками для збільшення жорсткості), що розміщена на опорах.

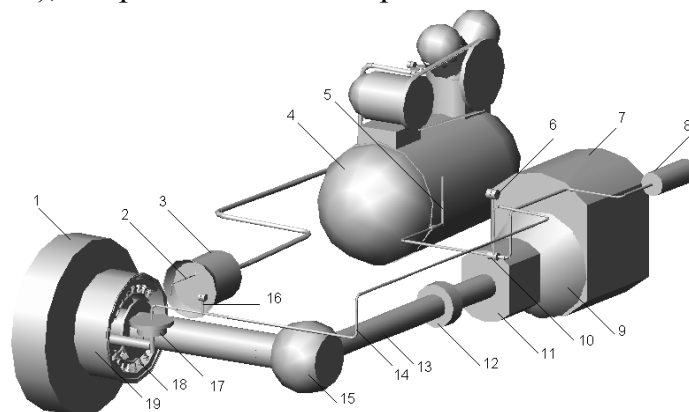


Рис. 4. Гальмовий стенд: 1 - інерційна маса; 2 - термопари; 3 - сопло повітряного охолодження гальм; 4 - компресор; 5 - привід гальм; 6 - спідометр; 7 - двигун; 8 - ресивер; 9 – фрикційне зчеплення; 10- гальмовий кран; 11 – коробка зміни передач; 12 - опора; 13 - вал; 14 - пневмопровід; 15 - кінцева передача; 16 - манометр гальмової камери; 17 - гальмова камера; 18 - теплова труба; 19 - гальмовий барабан.

**Дослідження динаміки зміни поверхневої температури зі зміною навантаженості пар тертя гальма при природному та примусовому охолодженні.** При дослідженні впливу чинників на тепловий стан пар тертя гальмового механізму при русі автотранспортного засобу змінною стану вважали експериментально визначену поверхневу температуру їх деталей, яку фіксували за допомогою термопар. До чинників, які впливають на хід процесу віднесли: час гальмування, який регулювався натисканням педалі гальма з кабіни водія та вимірювався таймером; початкова температура, яка вимірювалася термопарами перед проведенням досліду; гальмівний момент, що визначався аналітично. Кодування чинників здійснювалося згідно методики наведеної в [6], що дозволило перейти від системи координат у натуральних одиницях до системи координат у кодованій формі.

Час гальмування, що регулювався тривалістю натискання педалі гальма з кабіни водія та вимірювався таймером; початкову температуру, що регулювалася попереднім тепловим навантаженням на пари тертя і вимірювалася термопарами перед проведенням досліду; гальмівний момент змінювався в залежності від типу випробувань змінювали відповідно від 60 до 150 с, від 20 до 100 °С та від 850 до 1520 Нм.

Ввели позначення:  $x_1 = \tau$ ,  $x_2 = T_0$ ,  $x_3 = M_T$ ,  $y = T$ , де  $\tau$  – час гальмування;  $T_0$  – початкова температура;  $M_T$  - гальмівний момент у парі тертя.

Тоді чинники набули таких значень: мінімальні:  $x_{1\min} = 60$  с,  $x_{2\min} = 20$  °С,  $x_{3\min} = 850$  Нм; максимальні:  $x_{1\max} = 150$  с,  $x_{2\max} = 100$  °С,  $x_{3\max} = 1520$  Нм; середні:  $x_{1c} = 105$  с,  $x_{2c} = 60$  °С,  $x_{3c} = 1185$  Нм.

Інтервали зміни значень чинників:  $h_1 = 45$  с,  $h_2 = 40$  °С,  $h_3 = 335$  Нм.

При вивченні впливу декількох чинників на змінну стану використовували дробовий чинниковий експеримент типу 24-1. Складали матрицю планування експерименту, тобто план, який вмщував запис усіх комбінацій чинників в кодованій формі та робочу матрицю, де всі кодовані значення чинників замінили дійсними (табл. 2) і згідно з нею проводили експерименти. Дослідження проводили при температурі повітря 20 °С коефіцієнтові кочення 0,8 (для сухого асфальту). Враховуючи, що на значення вихідної змінної впливали похибки, досліди повторювали чотири рази. За цього отримали  $m$  паралельних значень змінної стану. Після отримання результатів експериментів визначили середнє значення функції відгуку  $y_u$   $u$ -го рядка матриці планування (табл. 3).

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_0^*$	Значення чинників					
		Умовна одиниця			Фактична величина		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\tau$ , с	$T_0$ , °С	$M_T$ , Нм
1	+1	+1	+1	+1	150	100	1520
2	+1	-1	+1	+1	60	100	1520
3	+1	+1	-1	+1	150	20	1520
4	+1	-1	-1	+1	60	20	1520
5	+1	+1	+1	-1	150	100	850
6	+1	-1	+1	-1	60	100	850
7	+1	+1	-1	-1	150	20	850
8	+1	-1	-1	-1	60	20	850

\* Примітка:  $x_0$  – стовпець значень фіктивної величини

За середніми значеннями функції відгуку відшукували рівняння лінійної моделі або рівняння регресії:

- для першого варіанту виконання пар тертя гальма

$$T^I = 144,2 + 32,9\tau + 34,5T_0 + 31,9M_{\Gamma}, \quad (1)$$

- для другого варіанту виконання пар тертя гальма

$$T^{II} = 137,7 + 30,5\tau + 33,7T_0 + 29,3M_{\Gamma}, \quad (2)$$

- для третього варіанту виконання пар тертя гальма

$$T^{III} = 133,3 + 29\tau + 33,3T_0 + 27,9M_{\Gamma}, \quad (3)$$

- для четвертого варіанту виконання пар тертя гальма

$$T^{IV} = 127,9 + 26,5\tau + 33,2T_0 + 26,8M_{\Gamma}. \quad (4)$$

Після визначення коефіцієнтів проводили статистичний аналіз рівняння регресії на трьох етапах: оцінка дисперсії відтворення або помилки експерименту; оцінка значимості коефіцієнтів рівняння регресії; оцінка адекватності регресійної моделі.

Таблиця 3

Експериментальні значення функції відгуку для всіх варіантів виконання пар тертя гальма

Номер експерименту	Експериментальні значення функції відгуку											
	$y_1$				$y_2$				$y_3$			
	Варіант виконання											
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	250	235	231	219	251	237	229	212	252	236	228	214
2	185	180	170	170	161	154	152	150	172	168	166	163
3	197	190	185	179	170	163	155	149	173	166	160	148
4	105	101	90	87	104	100	101	89	99	92	88	86
5	185	183	170	160	160	155	145	143	179	167	160	158
6	121	112	119	111	117	116	110	110	123	122	123	122
7	109	102	99	96	109	101	97	88	100	96	94	90
8	45	44	45	44	50	51	48	45	48	46	47	43
Номер експерименту	Експериментальні значення функції відгуку								$\bar{y}_u$			
	$y_4$											
	Варіант виконання											
	I	II	III	IV	I	II	III	IV				
1	239	222	219	210	248	233	227	214				
2	175	166	161	160	173	167	162	161				
3	175	165	151	147	179	171	163	156				
4	109	97	93	91	104	98	93	88				
5	173	174	170	167	174	170	161	157				
6	116	116	112	108	119	117	116	113				
7	111	100	104	89	107	100	99	91				
8	50	50	44	43	48	48	46	44				

В табл. 4 наведені результати статистичного аналізу рівнянь регресій. Величина табличних значень критеріїв Кохнера, Ст'юдента, Фішера становить відповідно: 0,52; 2,06; 2,78 [6]. Оскільки розрахункові значення критерію Кохнера (табл. 4) менші за його табличне значення, то гіпотеза про однорідність дисперсії справедлива. Помітно, що розрахункові значення критерію Ст'юдента для кожного критерію рівнянь регресії значно більші за табличне значення цього критерію, а це доводить, що всі критерії є значимими. Розрахункові значення критерію Фішера менші за табличні значення, отже рівняння регресії є адекватними.

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що запропоновані рівняння регресії (1 – 4) адекватно описують процес, оскільки, порівняння розрахункових значень поверхневої температури пар тертя з експериментальними свідчить про прийнятну їх збіжність (максимальне відхилення складає 8,3%).

Оскільки всі коефіцієнти регресії в усіх чотирьох рівняннях вищі 0, то всі чинники прямо пропорційно впливають на функцію відгуку. Згідно рівнянь регресії (1 – 4), домінуючий вплив на поверхневу температуру  $T$  має час гальмування  $\tau$ , коефіцієнт регресії цього параметру є найбільшим для всіх варіантів виконання гальм.

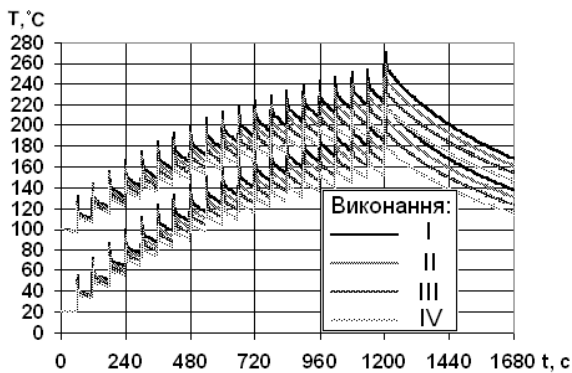
Таблиця 4

Результати статистичного аналізу рівнянь регресій

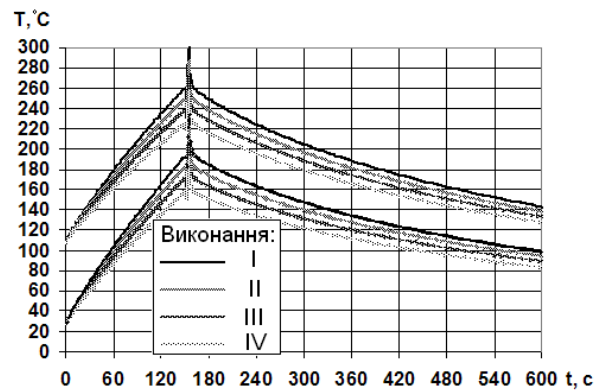
Ва- ріант вико- нан- ня	Перевірка:							
	однорідності дисперсії відтворення		значимості коефіцієнтів регресії				Довірчий інтервал	адекватн ості (критері й Фішера)
	Критерій Кохнера	Похибка відтворен ня	Критерій Ст'юдента					
			Коефіцієнти рівняння					
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$			
I	0,33	7,57	107,8	102,9	99,6	95,6	1,34	2,77
II	0,314	8,03	23,2	22,8	21,7	19,8	1,42	2,57
III	0,423	8,31	23,5	25,2	24,9	24,8	1,47	2,77
IV	0,497	7,79	23,2	21,9	20,8	20	1,38	2,71

На рис. 5 а,б,в показано залежність зміни поверхневої температури гальмового барабану від часу гальмування-охладження для різних виконань пар тертя барабанно-колодкових гальм при проведенні випробувань: циклічних (рис. 5 а); типу I (2,5 хвилинне гальмування) (рис. 5 б); та типу II (12 хвилинне гальмування) (рис. 5 в). Аналізуючи рис. 5 а,б,в, слід відзначити високу ефективність (до 22,5 %) пристроїв для охолодження пар тертя барабанно-колодкових гальм. Пристрої з 8 малих теплових труб з оребренням на кожній гальмовій колодці рекомендовано для циклічного режиму (тип I) та 150-ти секундного безперервного гальмуваннях, а 2 теплові труби з оребренням та з 16 секціями зони нагрівання на кожній гальмовій колодці – для довготривалого (тип II) режиму гальмування.

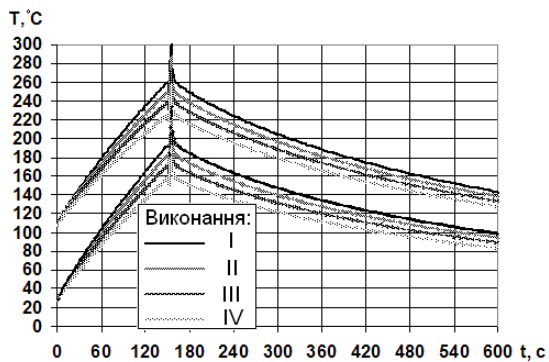
Визначення мікрометруванням зносу відпрацьованих фрикційних накладок та робочої поверхні гальмівного барабану показали, що застосування пристроїв для охолодження пар тертя барабанно-колодкових гальм дозволяє знизити знос фрикційних накладок та робочої поверхні гальмівного барабану відповідно на 15 % та на 10%.



а)



б)



в)

Рис. 5. а,б,в Залежність зміни поверхневої температури гальмового барабану від часу гальмування-охолодження для різних виконань пар тертя барабанно-колодкових гальм при проведенні випробувань: циклічних (а); типу I (б); типу II (в).

**Висновки.** В результаті проведення методом планування лабораторних та експлуатаційних експериментальних досліджень теплової завантаженості для чотирьох варіантів пар тертя барабанно-колодкових гальм автотранспортних засобів встановлено: динаміку зміни поверхневої температури пар тертя гальма з часом при природному та примусовому охолодженні; описано рівняння регресії поверхневої температури пар тертя гальма при природному та примусовому охолодженні в залежності від часу гальмування, початкової поверхневої температури барабана та гальмівного моменту пар тертя; відхилення розрахункових значень температур від експериментальних не перевищувало 8,3 %; ефективність пристроїв досягала 22,5 %.

**Список літератури:** 1. *Тормозные устройства: справочник* / [М.П. Александров, А.Г. Лысяков, Н.В. Федосеев, М.В. Новожилов]; под общ. ред. Александрова М.П. - М.: Машиностроение, 1985. - 312 с. 2. *Брайльчук П.Л.* Тормоз-замедлитель выхлопного типа для автомобиля ЗиЛ-130 / П.Л. Брайльчук, Б.Е. Найко, Б.А. Темиров // Труды Всесоюзной конференции «Пути повышения и экономической эффективности автомобилей, работающих в жарком районе и горных районах страны»: сб. науч. тр. – Душанбе, 1971.- С. 253-258. 3. *Генбом Б.Б.* Экспериментальные исследования энергоемкости тормозных механизмов / Б.Б. Генбом, В.Н. Кобылянский, А.М. Кизман [и др.] // Автомобильная промышленность. - 1966. - № 5. - С. 29-31. 4. *Вольченко А.И.* Теплонагруженность фрикционных узлов барабанно-колодочных тормозов транспортных средств / А.И. Вольченко, В.В. Дячук, В.В. Волощук, М.А. Спьяк // Науковий вісник національного гірничого університету. - Дніпропетровськ, 2004. – №1. - С. 61-63. 5. *Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів категорій М, N і O стосовно гальмування: ДСТУ UN/ECE R 13-09:2002.* – [Чинний від 2002-07-24]. – К.: Видавництво стандартів, 2002. – 18с. – (Національний стандарт України). 6. *Дорошенко В.М.* Основи наукових досліджень: навчальний посібник / В.М. Дорошенко. – К.: ІСДО, 1993. – 128 с.

Поступила у редколегію 13.05.09