

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В ШИРОКОМУ ТЕМПЕРАТУРНО-ШВИДКІСНОМУ ІНТЕРВАЛІ ДЕФОРМАЦІЇ

С.О. Бакай, В.А. Гурин, І.В. Гурин, І.М. Неклюдов, В.М. Горбатенко, С.Н. Дуб, В.М. Нетесов*

*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків;
*Інститут надтвердих матеріалів, м. Київ, Україна;
E-mail: serg.bakai@kipt.kharkov.ua; <http://www.kipt.kharkov.ua>*

Повідомлення присвячене опису методу дослідження ультразвукового впливу на фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів в ході пластичного деформування в вакуумі. Приведено принципову схему і опис створеної експериментальної установки, яка дозволяє проводити дослідження матеріалів цим способом. Методика та устаткування застосовано для вивчення впливу ультразвуку на фізико-механічні властивості вуглецевих композиційних матеріалів реакторобудування. Механічні властивості вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів досліджено у діапазоні температур від кімнатних до 600 °С при різних швидкостях деформації як в умовах ультразвукових вібрацій, так і без них. Проведено аналіз результатів, отриманих при використанні методу механічних випробувань вуглецевих зразків до та після ультразвукової обробки на нанотвердість. Приведено порівняльну оцінку отриманих експериментальних даних.

1. ВСТУП

Вивчення різних видів зовнішнього впливу на властивості конструкційних матеріалів є важливим з багатьох причин. Інтерес являє встановлення можливості використання матеріалу в тих умовах, які реалізуються в процесі його експлуатації. Добре відомо, що жорсткі умови роботи багатьох енергетичних пристроїв, які знаходяться під впливом різноманітних видів опромінення, є причиною передчасного часткового або повного їхнього виходу з ладу.

Іншим важливим чинником впливу на механічні властивості матеріалу є вібрації конструкції. Імітацією таких вібрацій може служити ультразвукове опромінення зразка досліджуваного матеріалу. В низці робіт цей метод успішно застосовано для дослідження впливу ультразвукових коливань на механічні властивості сталей і сплавів [1-4]. Як встановлено, механізмом впливу ультразвуку на механічні властивості матеріалів є рух і розмноження дислокацій, а також істотне збільшення коефіцієнта дифузії. Мікроскопічні механізми впливу ультразвуку на дифузію в твердих тілах вивчені в теоретичних роботах [5, 6].

До нинішнього часу створена база результатів експериментальних досліджень ультразвукового впливу на властивості металів і сплавів. Значна частина цих результатів представлена в відомій монографії [7].

На основі створеної бази даних розроблений цілий ряд технологічних прийомів, що широко використовуються в різноманітних галузях промисловості. Наприклад, ультразвуковий вплив використовується в ході термічної обробки матеріалів. В цьому випадку ультразвук ініціює

виділення зміцнюючих фаз, сприяє мартенситним перетворенням, що супроводжується збільшенням міцності багатьох конструкційних матеріалів [8-10]. Існує численність прикладів впливу ультразвуку на властивості матеріалів, однак говорити про те, що це питання всебічно вивчене, передчасно.

В останні роки використання сучасних технологій дозволило розробити і створити ряд нових, перспективних матеріалів. До таких матеріалів треба віднести сімейство хастелоїв (hastelloys), єврофер (eurofer), такий клас матеріалів, як багатокомпонентні металеві стекла та інші.

Окремий інтерес викликає такі конструкційні матеріали реакторобудування, як вуглець-вуглецеві композити, які широко використовуються при створенні високотемпературних газоохолоджуючихся реакторів (ВТГР). ВТГР представляють собою відносно новий напрямок в атомній енергетиці. Вони вигідно відрізняються від других типів реакторів можливістю комбінованої виробки електроенергії та теплової енергії для промисловості і комунально-побутових потреб, що дозволяє суттєво знизити долю витрат для виробництва тепла з гостродефіцитних та екологічно шкідливих традиційних видів палива.

Дослідження впливу ультразвуку на фізико-механічні властивості перерахованих матеріалів реакторобудування до нинішнього часу проведено не було.

2. МЕТА РОБОТИ

Метою виконаної роботи було створення методики, призначеної для дослідження впливу ультразвукових коливань на фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів в широкому температурно-швидкісному інтервалі деформування

в вакуумі. Зокрема, для дослідження впливу ультразвуку на властивості матеріалів що розробляються для використання в ВГТР та сольових ядерних реакторах, представниками яких є вуглецеві композиційні матеріали. Ультразвук може до деякого ступеня імітувати так звану „радіаційну тряску” [11], яка являє собою вплив на дифузію короткохвильових фононів, які генеруються при релаксації нестійких френкелевських пар і переміщень атомів під опроміненням.

3. ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Створений пристрій для деформації конструкційних матеріалів при ультразвуковому впливі містить:

- систему що навантажує, яка обладнана електродвигуном, перетворювачем частоти обертання електродвигуна, редукційною системою, динамометрами і захватами;
- вакуумну систему, яка складається з вакуумної камери, форвакуумного і дифузійного насосів;
- ультразвукову систему, яка складається з ультразвукового генератора, магнітострикційного перетворювача і концентратора ультразвуку;
- систему нагріву зразків матеріалів в вакуумі;
- загальну систему охолодження;
- систему зняття та реєстрації даних;
- приладову стійку з панеллю керування.

На пристрої можливо проведення досліджень матеріалів:

- в атмосфері і вакуумних умовах;
- в умовах деформації стиску і розтягу (для стиску передбачений необхідний пристрій);
- в температурному інтервалі $\sim 77 \dots \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$;
- у широкому швидкісному інтервалі деформації $0.01 \dots 4 \text{ мм/хв}$.

На рис. 1 уявлена принципова схема пристрою.

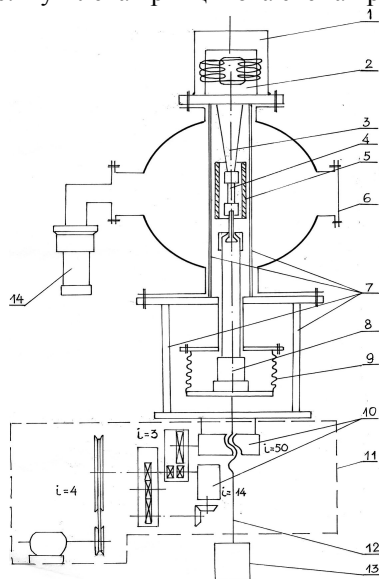


Рис. 1. Принципова схема пристрою для вивчення ультразвукового впливу на механічні властивості

матеріалів в широкому температурно-швидкісному інтервалі деформавання

На схемі позначені: 1 – водяний кожух; 2 – магнітострикційний перетворювач; 3 – концентратор ультразвуку; 4 – зразок матеріалу, що досліджується, жорстко прикріплений до ультразвукового концентратора; 5 – вакуумна піч; для можливості проведення низькотемпературних іспитів передбачена установка криостату; 6 – фланець з струмовводом; 7 – силові упори; 8 – динамометр з п'єзодатчиками сили; 9 – сифон; 10 – черв'ячні редуктори; 11 – кінематична схема редукційної системи; 12 – ходовий гвинт; 13 – динамометр з п'єзодатчиками деформації; 14 – дифузійний насос.

Механічна частина машини складається з привода активного захвату поз. 10, який являє собою черв'ячний редуктор швидкості з кроком ходового гвинта 12-3 мм, розташованого в цоколі машини. Навантаження здійснюється в межах двох діапазонів фіксованих швидкостей, кожний з яких являє собою ряд східців, що знижуються з більшим передавальним числом. Крім того, в кожному діапазоні існує можливість плавного регулювання швидкостей навантаження зразків шляхом зміни промислової частоти напруги, яка живить двигун привода, за допомогою частотного перетворювача.

Переключення діапазонів швидкостей активного захвату здійснюється вручну переміщенням шестірні, встановленої на верхній площині цоколя. Ходовий гвинт приведення з'єднаний з захватним ланцюжком машини через вакуумне ущільнення типу сифону 9. На цоколю машини встановлені послідовно знизу вверх вимірник деформації 13, ходовий гвинт 12 і силовимірник 8 (динамометр з встановленим на ньому тензодатчиком). Датчик сили, встановлений на динамометрі сприймає випробувальне навантаження і передає інформацію про її величину апаратурі що реєструє, встановленої поза машиною.

Для запобігання нагріву датчика сили він екранований розташованими на загальному ланцюжку екранами. Всередині нагрівальної електропечі 5 розміщений зразок 4, закріплений в захватах. Верхній захват жорстко кріпиться до концентратора ультразвуку 3. В випадках одноосового стиску зразок встановлюється в реверсивний пристрій, що забезпечує стиск, або у пристрій, який забезпечує стиск зразка, завдяки реверсивного ходу нагружувачій системи. Ультразвукові коливання магнітострикційного перетворювача 2, що знаходиться в ланцюзі з ультразвуковим генератором УЗГ 2-4 М, передаються на зразок шляхом концентратора 3. Охолодження магнітострикційного перетворювача здійснюється за допомогою водяного кожуха 1. Генератор УЗГ 2-4 М здатний створювати коливання в проміжку від 18 до 22 кГц, зміна потужності можлива в інтервалі від 2 до 4 кВт.

Вакуумні умови в камері створюються за допомогою дифузійного насосу 14, який знаходиться в ланцюзі з форвакуумним насосом.

Принцип дії машини зводиться до наступного: при іспиті на розтяг або стиск, короточасну повзучість і релаксацію, силосбудження створюється приведенням активного захвату. Швидкість деформації може змінюватись за допомогою редукційної системи спільно з регулятором частоти обертання електродвигуна ATV-28. Регулятор частоти обертання електродвигуна ATV-28 передбачає зміни частоти обертання електродвигуна від 2.5 до 75 Гц. Контроль за навантаженням здійснюється тензорезисторними датчиками.

Контроль і керування розігрівом зразка здійснюється з панелі керування приладним комплексом РІФ-101, а наявність вакууму в системі здійснюється іонізаційно-термопарним вакуумметром, розташованими на приладній стійці.

При досягненні необхідної температури управління розжаренням електропіч переходить в автоматичний режим, після чого задана температура нагріву підтримується постійною.

Контроль над деформацією зразка здійснюється за переміщенням ходового гвинта активного захвату динамометром з тензодатчиками деформації 13. Сигнал від датчика подається на вхід тензометричного підсилювача, що знаходиться на приладній стійці.

Комплексне охолодження пристрою здійснюється автономно за допомогою замкнутої системи, яка включає в себе циркуляційний трьохшвидкісний насос, металевий бак об'ємом 300 л, набір шлангів, які з'єднані вентилями в вузлах системи.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРІВ І ЇХНС ОБГОВОРЕННЯ

4.1. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ЗРАЗКИ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТИВ, ВИРІЗАНИХ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ОСІ ВИХІДНОГО ЗРАЗКА

Були проведені іспити зразків піровуглецю як перспективного конструкційного матеріалу реакторобудування.

Вихідний зразок виготовлен в формі товстостінної труби, зразки, які безпосередньо використовувалися для іспитів, вирізані з вихідного зразка перпендикулярно осі такого. Зразки піровуглецю вирізані в циліндричній формі, їх висота складала 17 мм, початкова площа поперечного перетину зразків складала 56,5 мм². Іспити проводилися при кімнатній температурі при різних швидкостях деформації стиску від 2 до 0,02 мм/хв.

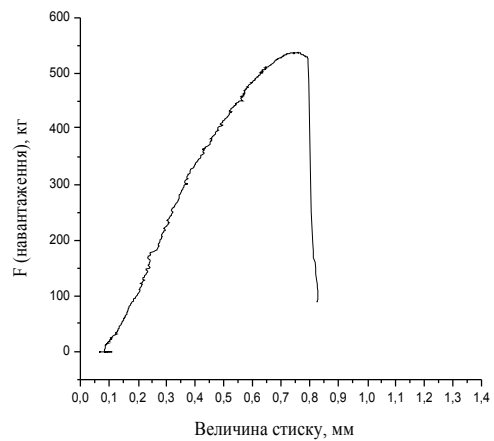


Рис. 2. Типова деформаційна крива отримана у ході дослідження механічних властивостей зразків піровуглецю, отримана при швидкості стиску 0.2 мм/хв., без ультразвукового впливу

На рис. 2 зображена типова деформаційна крива з іспиту механічних властивостей зразків піровуглецю, отримана при швидкості стиску 0.2 мм/хв, без ультразвукового впливу.

Вихідна потужність сигналу з генератора УЗГ 2-4М складала (2,5±0,5) кВт. Резонансна частота, що існує для знов розрахованого та зробленого концентратора ультразвука, з використанням магнітострикційного перетворювача, складає ~19.85 кГц. Максимальна амплітуда коливань складала 20 мкм. При ультразвуковому впливі, в ході деформації, характер деформаційних кривих для зразків піровуглецю, не змінювався. Зміна швидкостей деформування не вплинула на характер деформаційних кривих та характер їх руйнування як із звуковим впливом, так і без нього.

Слідє помітити, що характер руйнування досліджених зразків піровуглецю у ході деформації, без ультразвукового впливу і з ним, істотно відрізняється один від одного. У першому випадку, у ході деформації, утворюється смуга зрушення, кут нахилу смуги зрушення до осі зразка, як правило, складає біля 45° (рис. 3,а). При подальшому навантаженні зразка, в площині смуги зрушення, відбувається зсув однієї частини зразка по відношенню до другої. Причому, смуга зрушення може зародитися в будь-якій частині зразка, як у верхньої опори стиску, так і у нижньої.

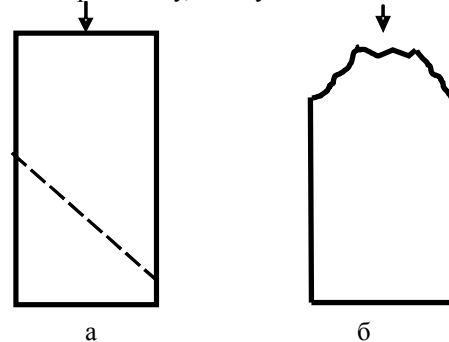


Рис. 3. Схематичне зображення вигляду руйнування зразків піровуглецю у ході деформації без впливу звука (а) і при його впливі(б), відповідно

При ультразвуковому впливі, у ході деформації стиску, досліджені зразки піровуглеця руйнуються, винятково, поблизу верхньої опори, якою є ультразвуковий концентратор (рис. 3,б). Потрібно помітити, що руйнується поверхневий шар зразка товщиною біля 4 мм. Причому, руйнування відбувається внаслідок утворення множинних тріщин у цьому шарі. Це говорить про те, що ультразвук не розповсюджується в зразку, а поглинається верхнім шаром зразка, що знаходиться в безпосередньому контакті з ультразвуковим концентратором.

4.2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВОГО КОМПОЗИТУ МЕТОДОМ МІКРОТВЕРДОСТІ ТА НАНОІНДЕНТУВАННЯ

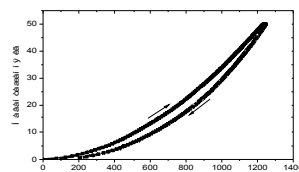
З метою дослідження процесів пластичної деформації, яка відбувається в зразках вуглець-вуглецевого композиту під час ультразвукового озвучування, були проведені дослідження мікротвердості поверхні поперечного перетину зразків до та після озвучування. Слід сказати, що зразки композиту були такі самі, як і ті, що використовувалися для досліджень описаних вище, тобто вирізаних з вуглецевої труби перпендикулярно її вісі. Виявилося, що отримати результати досліджень зміни мікротвердості на зразках цього матеріалу не можливо, відбитків індентора після циклу навантаження-розвантаження на поверхні зразків побачити не вдалося. Ми вважаємо, що це зв'язано з пружними властивостями цього матеріалу.

Також, для дослідження механічних властивостей зразків вуглець-вуглецевого композиту до та після ультразвукового озвучування був застосований метод наноіндентування.

Методом наноіндентування на нанотвердомірі Nano Indenter-II MTS Systems визначали механічні властивості вуглець-вуглецевих композитів. Дослідження виконували з використанням тригранного індентора Берковича при навантаженні 50 мН (≈ 5 г) при постійній швидкості збільшення навантаження, що складала 0,5 та 2 мН/с відповідно. На кожний зразок наносили по кілька відбитків на відстані 50 мкм один від одного. Твердість та модуль пружності визначали за глибиною відбитку згідно методиці Олівера та Фарра [12]. Детально ця методика описана в роботі [13].

Для проведення досліджень були використані: вихідні зразки композиту, зразки, озвучені, під навантаженням близько 200 кг, протягом 3, 5 та 7 хвилин. Частота коливань складала 19,85 кГц, яка є резонансною частотою ультразвукової системи, вихідна амплітуда коливань складала 20 мкм. На рис. 4 представлена типова діаграма навантаження індентора Берковича для досліджених зразків

вуглець-вуглецевого композиту до та після ультразвукового озвучення.



Переміщення, мм

Переміщення, мм

Рис. 4. Типова діаграма навантаження індентора Берковича для досліджених зразків вуглець-вуглецевого композиту. Навантаження 50 мН (близько 5 грам)

В таблиці показані результати наноіндентування зразків вуглець-вуглецевого композиту до та після ультразвукового озвучення: в першій колонці – номер зразка та час озвучення, у другій – значення зміщення по глибині (нм), у третій – значення навантаження (mN), у четвертій – значення модуля Юнга (E, GPa), у п'ятій – значення нанотвердості (H, GPa).

Результати досліджень нанотвердості в зразках вуглець-вуглецевого композиту

Номер зразка, час озвучення	Переміщення, мм	Навантаження, мН	E, ГПа	H, ГПа
1. Вихідний зразок	1043,2	50,0	29,8	3,7
	1246,3	50,0	19,4	2,9
	1262,7	50,0	19,4	2,8
	1051,0	50,0	25,4	4,4
середнє	1150,8	50,0	23,5	3,5
станд. відхил.	120,0	0,0	5,1	0,8
2. Вихідний зразок	1159,1	50,0	21,9	3,4
	1249,1	50,0	19,1	2,9
	1132,4	50,0	25,6	3,1
	1163,6	50,0	21,6	3,4
	1326,0	50,0	21,4	2,1
середнє	1206,0	50,0	21,9	3,0
станд. відхил.	80,1	0,0	2,3	0,6
3. 7 хвилин	1124,1	50,0	25,0	3,3
	985,1	50,0	33,0	4,2
	1257,2	50,0	21,6	2,5
	1120,7	50,0	23,6	3,6
	1425,1	50,0	19,1	1,8
середнє	1182,4	50,0	24,5	3,1
станд. відхил.	166,3	0,0	5,3	0,9

	1286,4	50,0	20,5	2,4
	1120,1	50,0	23,4	3,7
	1216,2	50,0	20,6	3,0
	1313,1	50,0	19,9	2,3
4. 5 хвилин	1292,1	50,0	18,0	2,7
середнє	1245,6	50,0	20,5	2,8
станд. відхил.	79,0	0,0	1,9	0,6
	1342,6	50,0	19,1	2,2
5.				
5 хвилин	1191,2	50,0	20,9	3,2
середнє	1298,8	50,0	20,7	2,4
станд. відхил.	93,7	0,0	1,5	0,7
	1120,5	50,0	24,9	3,4
	1183,9	50,0	22,6	3,0
	1212,0	50,0	22,6	2,7
6. 3 хвилини	1216,6	50,0	20,6	3,0
середнє	1183,3	50,0	22,7	3,0
станд. відхил.	44,2	0,0	1,7	0,3
	1186,4	50,0	22,8	3,0
	1109,3	50,0	24,7	3,6
7. 3 хвилини	1099,5	50,0	24,6	3,7
середнє	1131,8	50,0	24,0	3,4
станд. відхил.	47,6	0,0	1,1	0,4

Аналізуючи представлені вище результати дослідження нанотвердості в зразках вуглець-вуглецевого композиту до та після ультразвукового озвучування, можна зробити висновок, що ультразвукове озвучування ні яким чином не впливає на нанотвердість, пружність та пластичність цього матеріалу.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що під впливом ультразвука в вуглець-вуглецевих композитах не відбувається істотних мікроструктурних та наноструктурних змін незалежно від часу озвучення.

4.3. Результати та обговорення дослідження впливу ультразвуку на зразки вуглець-вуглецевих композитів при кімнатній температурі та при 600°C, вирізаних паралельно осі вихідного зразка

Для можливості проведення порівняльного аналізу результатів дослідження впливу ультразвуку на механічних властивості зразків вуглець-вуглецевих композитів, вирізаних із вихідного зразка перпендикулярно та паралельно його осі, був вирізаний ряд зразків паралельно осі вихідного зразка. Довжина зразків складала 16 мм, діаметр 8 мм. Початкова площа поперечного перетину зразків була 50,24 мм².

На рис. 5 зображена типова крива залежності деформації від навантаження отримана при кімнатній температурі без ультразвукового озвучення.

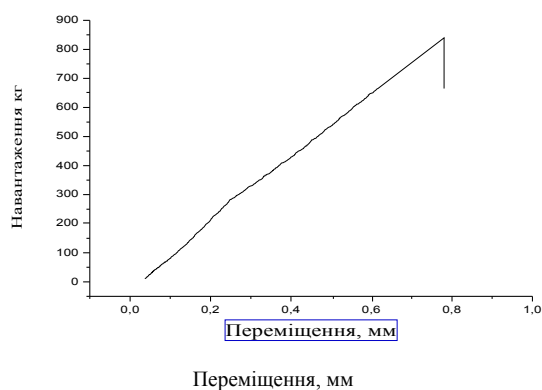


Рис. 5. Крива залежності деформації від навантаження отримана при кімнатній температурі без ультразвукового озвучення

Деяку нерівність кривих деформації при навантаженні, від 100 до 350 кг, пояснює не досконала жорсткість вакуумної камери на яку приходилось навантаження. Цей недолік буде усунутий в найближчому майбутньому.

Середня межа міцності для зразків вуглець-вуглецевого композиту, вирізаних паралельно осі вихідного зразка, при кімнатній температурі складає 15 кг/мм². Це значення відрізняється від значення межі міцності для зразків вуглець-вуглецевого композиту, вирізаних перпендикулярно осі вихідного зразка, при кімнатній температурі воно складало 10 кг/мм².

Характер кривих деформації та значення межі міцності зразків композиту, отриманих у ході ультразвукового озвучення, не відрізняються від таких самих отриманих без ультразвукового впливу. Зміна швидкості навантаження, в межах від 0,02 мм/хв до 4 мм/хв, також не дає змін для характеру кривих та значень межі міцності.

Було проведено ряд досліджень механічних властивостей зразків композиту із ультразвуком та без звука при температурі 600 °C.

Крива залежності деформації від навантаження, отримана при температурі 600 °C без ультразвукового озвучення, була така сама, як і крива отримана при кімнатній температурі (див. рис. 5).

Характер кривих деформації та значення межі міцності зразків композиту, отриманих в ході ультразвукового озвучення при температурі 600 °C, не відрізняються від таких самих отриманих без ультразвукового впливу. Частота ультразвукових коливань, як і у попередніх дослідженнях складала приблизно

19,85 кГц, амплітуда коливань – 20 мкм. Ультразвук вмикався одночасно з початком навантаження зразків. Зміна швидкості навантаження в межах 0,02...4 мм/хв також не дає змін для характеру кривих та значень межі міцності. Середнє значення межі міцності зразків піровуглецю досліджених при температурі 600 °C таке саме, як і для зразків досліджених при кімнатній температурі, та складає 15 кг/мм².

Були проведені іспити зразків композиту при імпульсному озвученні у ході навантаження як при кімнатній температурі, так і при температурі 600 °С. Хочеться відмітити, що деформаційні криві та механічні властивості імпульсно озвучених зразків при кімнатній температурі та температурі 600 °С не відрізняються друг від друга, як і від раніш отриманих результатів дослідження механічних властивостей зразків вуглецевих композитів, вирізаних паралельно осі вихідного зразка.

На рис. 6 зображена типова крива залежності деформації від навантаження отримана при температурі 600 °С із імпульсним ультразвуковим озвученням.

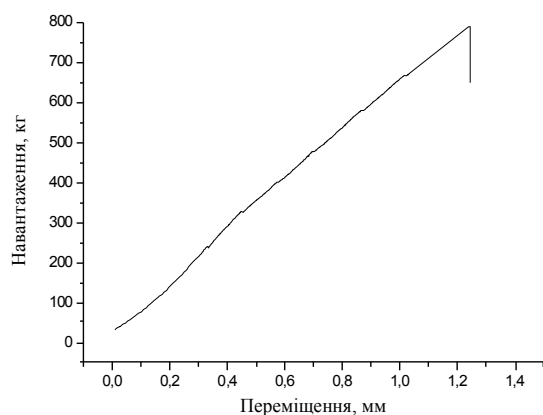


Рис. 6. Типова крива залежності деформації від навантаження отримана при температурі 600 °С із імпульсним ультразвуковим озвученням

На деформаційній кривій, що зображена на рис. 6, можна помітити невеликі сходинки, які з'являлись при включенні ультразвука. Природно припустити, що це пов'язано з локальними розвантаженнями під впливом звуку.

Слід сказати, що при руйнуванні зразків, вирізаних паралельно вісі вихідного зразка, лунає гучний звуковий імпульс на відміну від руйнування зразків композиту, вирізаних перпендикулярно вісі вихідного зразка. Характер деформаційних кривих для цих двох типів зразків також відрізняється, на завершальній стадії деформації, перед руйнуванням. Зразки, вирізані паралельно вісі вихідного зразка, пружно деформуються до моменту руйнування (див. рис. 5, 6), для зразків, вирізаних перпендикулярно вісі вихідного зразка, перед руйнуванням, ми бачимо деякий загин деформаційної кривої (див. рис. 4). Цю різницю ми пов'язуємо з різним характером руйнування зразків, зумовленим їх структурними особливостями таких. У випадку зразків, вирізаних перпендикулярно вісі вихідного зразка, шари вуглецевих волокон лежать перпендикулярно до вісі стискання, а у випадку зразків, які вирізані паралельно вісі вихідного зразка, вони лежать паралельно вісі стискання. Структурна анізотропія проявляється в характері кривої напруженість-деформація. Нажаль ми не

маємо відповідних теоретичних залежностей $\varepsilon(\sigma)$ для композитних матеріалів, які б враховували цю анізотропію, хоч на якісному рівні таку поведінку матеріалу не важко зрозуміти.

На рис. 7 зображений типово зруйнований зразок композиту, який був вирізаний паралельно осі вихідного зразка.

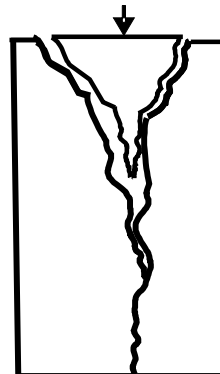


Рис. 7. Типовий вигляд зруйнованого зразка вуглець-вуглецевого композиту, який був вирізаний паралельно осі вихідного зразка

Характер руйнування цього зразка можливо порівняти з характером руйнування зразків, вирізаних перпендикулярно осі вихідного зразка, які зображені на рис. 3, а, б.

5. ВИСНОВКИ

1. Створено експериментальний пристрій для дослідження впливу ультразвука на механічні властивості матеріалів в широкому температурно-швидкісному інтервалі деформацій.
2. Середнє значення межі міцності зразків вуглець-вуглецевого композиту, вирізаних паралельно вісі вихідного зразка, складає 15 кг/мм², що істотно відрізняється від середнього значення межі міцності зразків композиту, вирізаних перпендикулярно вісі вихідного зразка, яке складає 10 кг/мм².
3. Характер руйнування зразків піровуглецю, вирізаних із вихідної труби перпендикулярно її вісі, в ході деформації, без ультразвукового впливу і з ним, істотно відрізняються один від одного. У першому випадку у ході деформації утворюється смуга зсуву, кут нахилу смуги зсуву до осі зразка, як правило, складає біля 45°. При наявності ультразвукової дії, у ході деформації стискування зразки вуглець-вуглецевого композиту руйнуються в приповерхневому шарі, винятково, поблизу верхньої опори, якою є ультразвуковий концентратор.
4. Цілком можливо, що зміна моди руйнування зразків вуглець-вуглецевого композиту, вирізаних із вуглецевої труби перпендикулярно осі такої, під дією

- ультразвуку, відбувається внаслідок абсорбції ультразвуку в приповерхневому шарі товщиною до 4 мм. Слід очікувати, що при використанні такого типу піровуглеця, як конструкційного матеріалу термоядерних реакторів, в ході експлуатації, руйнування матеріалу буде відбуватися в шарах, які знаходяться в безпосередньому контакті зі стінками реактора, внаслідок вібрації останніх.
5. За рахунок структурних відмінностей зразків вуглець-вуглецевих композитів, вирізаних під різними кутами (перпендикулярно та паралельно) відносно вісі вихідного зразка, характер руйнування та характер деформаційних кривих для двох типів зразків істотно відрізняються один від одного.
 6. Результати проведених методом визначення мікротвердості та наноіндентування досліджень свідчать про те, що під впливом ультразвуку в вуглець-вуглецевих композитах не відбувається мікроструктурних та наноструктурних змін незалежно від часу озвучення.
 7. Безперервне та імпульсне ультразвукове озвучення зразків вуглець-вуглецевого композиту, проведене в ході деформування як при кімнатній температурі, так і при температурі 600 °С, не впливає на їх механічні властивості. Причём, це стосується обох структурних типів зразків: вирізаних паралельно та перпендикулярно вісі вихідного зразка.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.П. Северденко, В.В. Клубович. *Применение ультразвука в промышленности*. Минск: «Наука и техника», 1967.
2. И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, Г.Н. Малик, О.И. Волчок. Пластическая деформация поликристаллического алюминия под действием ультразвуковых импульсов // *ФТТ*. 1969, т. 11, №11, с. 3236–3241.
3. И.А. Гиндин, Г.Н. Малик, И.М. Неклюдов, О.Т. Розумный. Влияние ультразвуковых колебаний на параметры кривой упрочнения монокристаллов меди // *Известия высших учебных заведений. Физика* 1972, №2, с. 51-56.
4. И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, Г.Н. Малик, О.Т. Розумный. Действие ультразвуковых колебаний на сопротивление пластической деформации кристаллов // *ФТТ*. 1972, т. 14, №5, с. 1308–1313.
5. A.S. Bakai and N.P. Lazarev. Effect of acoustic waves on the diffusion of interstitial impurity atoms in a solid // *Sov. Phys. Solid State*. 1986, v. 28, p. 1373.
6. В.С. Бирант. *Застосування ультразвуку при термічній обробці металів*. М: «Металургія», 1977.
7. А.В. Кулемин. *Ультразвук і диффузія в металлах*. М: «Металургія», 1978.
8. А. с. СРСР № 711128, кл. 3 21. Д 7/14, 1980.
9. А. с. СРСР № 449943, кл. 3 21. Д 7/14, 1974.
10. А. с. СРСР №589264, кл. 3 21. Д 7/14, 1978.
11. В.Л. Инденбом // *Письма в ЖТФ*. 1979, №5, с. 489.
12. W.C. Oliver and G.M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *J. Mater. Res.* 1992, v. 7, N 6, p. 1564–1583.
13. С.Н.Дуб, Н.В.Новиков. Испытания твердых тел на нанотвердость // *Сверхтвердые материалы*. 2004, №6, с. 16.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНОМ ИНТЕРВАЛЕ ДЕФОРМАЦИЙ

С.А. Бакай, В.А. Гурин, И.В. Гурин, И.М. Неклюдов, В.М. Горбатенко, С.Н. Дуб, В.М. Нетесов

Настоящее сообщение посвящено описанию метода исследования влияния ультразвука на физико-механические свойства конструкционных материалов в ходе пластической деформации в вакууме. Приводится принципиальная схема и описание вновь созданной экспериментальной установки, которая позволяет проводить исследования этим методом. Созданная методика и оборудование было апробировано для изучения влияния ультразвука на физико-механические свойства углеродных композиционных материалов реакторостроения. Механические свойства углерод-углеродных композиционных материалов исследованы в диапазоне температур от комнатных до 600 °С, при различных скоростях деформации, в условиях ультразвуковых вибраций и без них. Проведен анализ результатов полученных при использовании метода механических испытаний образцов углерода до и после ультразвуковой обработки на нанотвердость. Приведена сравнительная оценка полученных экспериментальных данных.

**METODOLOGY OF INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASONIC OSCILLATIONS
ON MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL MATERIALS IN A WIDE RANGE
OF TEMPERATURES AND STRAIN RATES**

S.O. Bakai, V.A. Gurin, I.V. Gurin, I.M. Neklyudov, V.M. Gorbatenko, S.N. Dub, V.M. Netesov

The present message is devoted to the description of a method of research of influence of ultrasound on physicochemical properties of constructional materials during plastic deformation in vacuum. The functional diagram and the description of created experimental facility which allows to carry out researches by this method is resulted. The created method and the equipment it has been approved for studying influence of ultrasound on physicochemical properties of carbon composite materials of nuclear reactor industry. Mechanical properties of carbon - carbon composite materials are investigated in a range of temperatures from room up to 600 °C, at various strain rates, in conditions of ultrasonic vibrations and without them. The analysis of results received is carried out at use of a method of mechanical tests of samples of carbon before ultrasonic processing on nanohardness. The comparative estimation of the received experimental data is resulted.