

УДК 539.3

В.А. Тітов, д-р техн.наук, проф., А.Д. Лавріненков, асп., Н.К. Злочевська, ас.
НТУ України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З АРМУЮЧИМИ КОМПОНЕНТАМИ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ

Проведено конечно-элементное моделирование деформирования композита системы Al–Сталь с волокнами поперечное сечение которых имеет разную форму: круг; квадрат; квадрат, повернутый на 45° (ромб). Получены данные напряженно-деформированного состояния композита, энергетические параметры процесса. Исследована структура титанового сплава с эвтектикой TiB_n при прессовании, оценено влияние течения основного металла на фазовые включения.

The finite-element simulation of deformation of composite Al–Steel with fibers of the different form was carried out. Circle, square, square turned on 45° (diamond-shaped is similar) were chosen as forms of fibers. Data of the intense-deformed condition of a composite, energy parameters of process were obtained. The structure of titanium alloy with eutectic TiB_n was investigated after pressing, influence of the basic metal flow on phase inclusions was estimated.

В промисловості існує тенденція до розширення галузей використання композиційних матеріалів (КМ) на металевій матриці [1]. Їх використання визначає рівень ефективності конструкції виробів машинобудування внаслідок високих фізико–механічних та фізико–хімічних характеристик КМ. Виробництво конструкцій з КМ спирається на типові процеси машинобудування [2].

В останній час перспективу використання набувають “квазікомпозиційні” матеріали, що евтектично зміцненні карбідами, борідами, нітридами та іншими високоміцними фазами, які мають довільні геометричні форми. В процесах пластичного деформування армуючі компоненти під впливом деформацій зсуву подрібнюються та переміщуються спільно з пластичною матрицею матеріалу. Відомі роботи [3,4 та інші] з технологічної механіки пластичного деформування КМ теоретично досліджують композити з армуючими елементами правильної форми поперечний переріз яких має форму круга. Тому дослідження особливостей пластичного деформування КМ з армуючими компонентами довільної форми є актуальною науково–технічною задачею.

Метою роботи є дослідження впливу форми поперечного перерізу волокна на напружено деформований стан матриці та експериментального дослідження плинну евтектично зміцненого матеріалу.

Для цього було вирішено наступні завдання:

1. Проведено моделювання процесу деформування композиту системи Al–Сталь з волокнами поперечний переріз яких приймався різної форми з визначенням напружено–деформованого стану компонент композиту та енергетичних параметрів процесу.

2. Проведено пресування зразка із евтектично зміцненого титанового сплаву з армуючим компонентом довільної форми та досліджено структуру здеформованого матеріалу.

Моделювання деформування на розтяг елементарного об’єму КМ системи Al–Сталь проводилась з використанням програмного комплексу Abaqus [5,6], який дозволяє ефективно вирішувати як прості лінійні так і складані нелінійні задачі. Форма поперечного перерізу волокон приймалася наступна: а) кругла; б) квадратна; в) квадратна, яка повернута на 45° або ромбовидна. Габаритний розмір кожного перерізу прийнятий однаковим. В якості матеріалу матриці задавались параметри алюмінієвого сплаву АД33, в якості матеріалу волокон – параметри сталі. Основні параметри сплаву АД33 та сталі наведено в таблиці.

Таблиця

Параметри	АД33	Сталь
Межа текучості σ_T , МПа	30	566,75
Межа міцності σ_B , МПа	165	841,8
Модуль пружності E, МПа	$7,1 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуассона,	0,3	0,3

В якості типу аналізу приймався Abaqus/Standart, тип кроку розрахунку – Static, General. Деформація проводилась шляхом одновісного розтягування виділеного об’єму КМ: один торець КМ вважався нерухомим, протилежному торцю задавалось переміщення U_x , величина якого відповідала відносному подовженню КМ $\delta=5\%$. Кількість кінцевих елементів моделі КМ для різних форм поперечного перерізу волокон була наступною: 1) для квадрату – 17960; 2) для ромбу – 17920; 3) для круга – 18180. Тип елемента – C3D8R. Схема процесу деформування

та розбиття моделі на сітку скінченних елементів показано на рис.1 на прикладі композиту з волокнами, поперечний переріз яких – квадрат.

Кількість волокон в елементарному об'ємі КМ приймалася рівною 3. При такій кількості волокон картина розподілу напружено-деформованого стану по об'єму композиту та течія матеріалу є достовірною. При більшій кількості волокон характер та картина течії матеріалу матриці не змінюється, а час розрахунку суттєво збільшується.

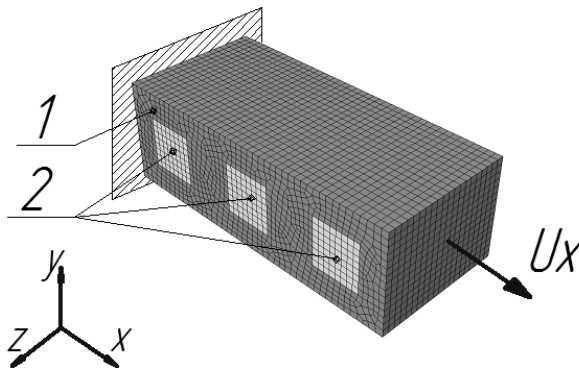


Рис. 1. Кінцево-елементна модель КМ та схема процесу деформування; 1 – матриця; 2 – волокно; U_x – переміщення торця КМ вздовж осі x

При моделюванні не ставилась задача дослідження руйнування КМ або характер створення та розповсюдження тріщини, яка може сформуватись при критичних ступенях деформацій. З огляду на це, було зроблено деяке спрощення при створенні контакту між волокном та матрицею. А саме, волокно розглядалось як частина матриці, якій присвоєно механічні властивості сталі. При такому способі завдання волокон розшарування матриці від волокна та утворення тріщини, як в матриці так і у волокні, спостерігатись не буде. Розподіл деформацій КМ показано на рис.2.

Деформації в матриці КМ розвиваються по лініях між вершинами волокон, що підтверджує результати [4].

Ступінь деформації в осередку деформації

на перетині ліній розповсюдження деформацій складає 20–30%, що більше ніж в осередку деформації КМ з волокнами поперечний переріз яких круг – 14–16%, ромб – 16–20%. Ступінь деформації матриці композиту, на границі волокно-матриця з волокнами квадратної форми складає 0,3–11%, круглої форми – 1,5% – 12%, ромбовидної форми – 7–17%. Очевидно, що при квадратній формі волокон імовірність розшарування матриці від волокна менше ніж при круглій або ромбовидній, так як при квадратній формі ступінь деформації матриці на границі матриця-волокно менша ніж у інших двох випадках.

У КМ з волокном квадратної форми за рахунок того, що дві поверхні волокна розташовані під кутом 90° до напрямку течії матеріалу матриці, біля поверхонь волокна формуються області, де матеріал матриці практично не деформується. В цьому місці створюється напружений стан всебічного стиску матриці КМ (див.рис.2,а). Ступінь деформації границі волокна квадратної форми складає 0,16–0,9%, ромбовидної – 0%, круглої – 0%. Волокна круглої та ромбовидної форми не деформуються, а якщо і будуть деформуватись при більшому ступені деформування, то на величину, якою з огляду на її малість можна знехтувати.

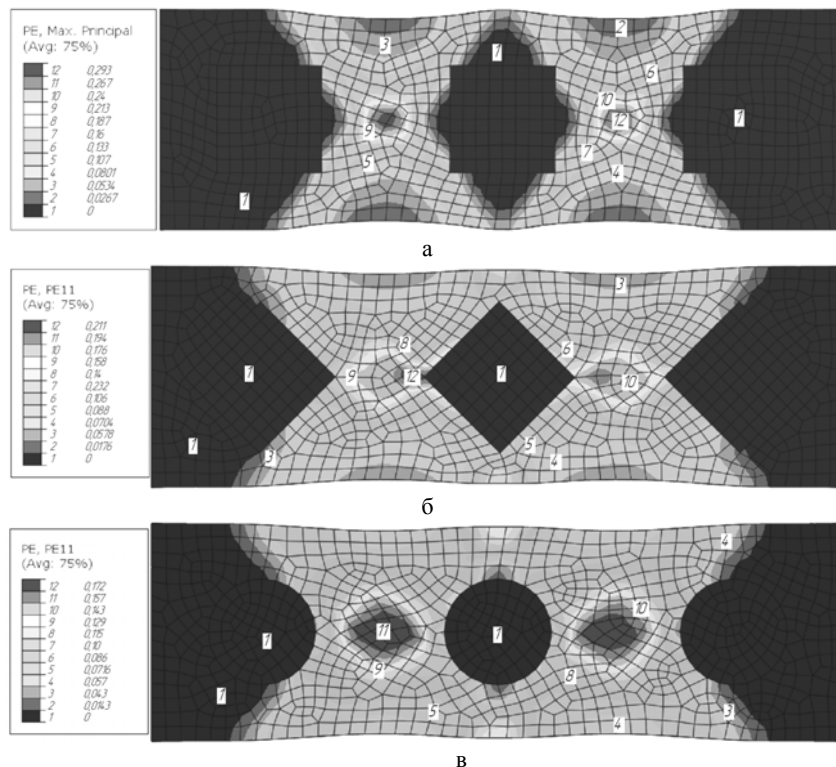


Рис. 2 Розподіл деформацій ϵ_x в плоскому перерізі виділеного об'єму композиту Al-Сталь при відносному подовженні $\delta=5\%$ з волокнами поперечний переріз яких: а) квадрат; б) ромб; в) круг

На рис. 3 зображено графік роботи, яка витрачається на деформування композиту в залежності від величини відносного подовження ψ . Так, робота деформування КМ з волокнами, форма поперечного перерізу яких квадратна, більша ніж при деформуванні КМ з волокнами інших форм, з чого випливає, що і зусилля, яке необхідно прикласти для пластичного деформування композиту з волокнами квадратної форми буде більшим. Так, робота деформування КМ з волокнами квадратної форми на 5–6% більше від роботи деформування КМ з волокнами круглої форми та на 3–4 % – з волокнами ромбовидної форми.

Збільшення роботи деформування композиту з волокнами квадратної форми пояснюється наявністю областей всебічного стиску біля поверхонь волокон, де матеріал матриці практично не деформується (рис.2,а).

При деформуванні КМ з волокнами поперечний переріз яких має форму квадрату відбувається незначне пластичне деформування волокна в місцях, які розташовані на шляху інтенсивної течії матеріалу матриці КМ, а саме кутів волокна, на відміну від волокон форма поперечного перерізу яких – круг та ромб. Поведінка армуючих компонент довільної форми при пластичних деформаціях експериментально була досліджена на прикладі евтектично зміцненого титанового сплаву.

Дослідження по ізотермічному пресуванню заготовок із титанового сплаву системи $Ti - TiV_n$ проводилось на кривошипному одностійковому пресі зусиллям 1000 кН. Металографічний аналіз виконувався на оптичному мікроскопі моделі МІ-8М, з камерою Webbers M300. В якості реактиву, за допомогою якого виконувалося травлення шліфа зразка, використана плавикова кислота 50% концентрації. На рис. 4 показана схема характерних зон розвитку деформацій, які виникають при деформуванні.

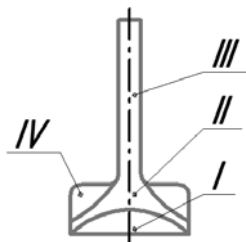


Рис.4. Характерні зони поперечного перерізу зразка лопатки, що виникають при ізотермічному пресуванні

Площини зразка умовно можна поділити на наступні зони в залежності від характеру течії металу при пресуванні:

I – зона, що стикається з пуансоном. Матеріал цієї зони внаслідок значних сил тертя, практично не деформується;

II – зона інтенсивної течії металу у порожнину матриці. Максимальні лінії току є дотичними до обвідної зони I та радіусів галтелей;

III – зона сталої течії, де матеріал заповнює порожнину матриці постійного поперечного перерізу;

IV – зона, що характеризується великими умовами розвитку деформацій.

На рис. 5 наведено структури матеріалу відповідно до характерних зон деформованого зразка, зображених на рис.5.

В наслідок малих деформацій, структура металу в зонах I та IV (рис. 5,а) близька до вихідної структури, що характерна для литої структури. Видно, що розташування включень евтектики $Ti - TiV_n$ має хаотичний характер.

Включення мають нерівнобісну структуру та сильно різняться за розміром. В зонах інтенсивної деформації металу II та III (рис.5,б) проходить подрібнення конгломератів евтектики. Фазові включення орієнтуються за напрямком течії металу, включення приймають рівнобісну, подовжену форму. Густина включень внаслідок перерозподілу об'єму металу та його течії вирівнялась.

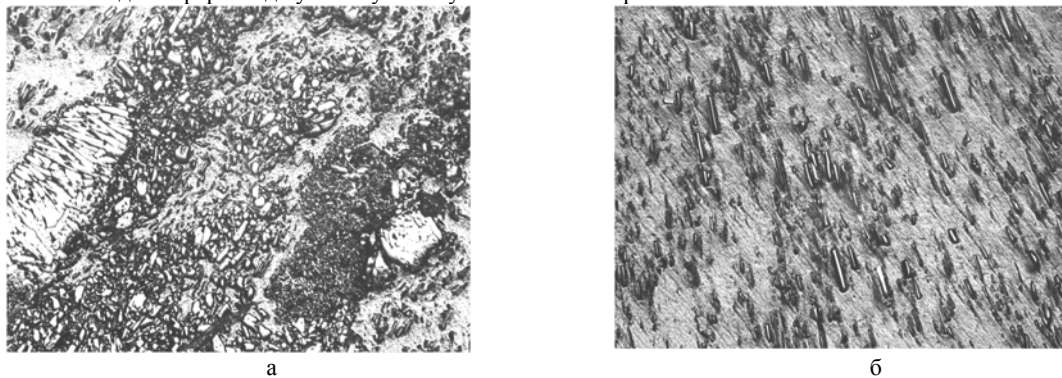


Рис. 5. Структура матеріалу: а – зони I та IV; б – зона II та III

Виходячи із розрахунку деформованого стану композиту системи Al–Сталь (рис.2), видно, що орієнтація волокон довільної форми в залежності від поперечного перерізу волокна при активній течії матеріалу матриці прямує до

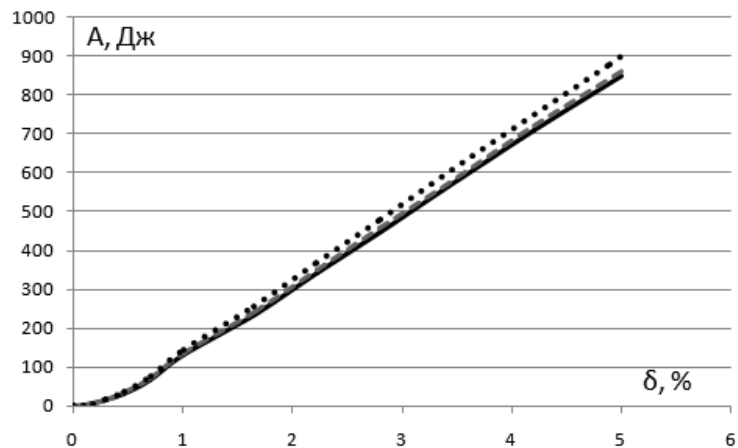


Рис. 3 Залежність роботи деформування від відносного подовження δ композиту з волокном, форма поперечного перерізу якого: – квадрат; - - - - – ромб; — — — — – круг

орієнтації, при якій протидія течії матеріалу матриці буде найменша, а отже і напруження в тілі волокна та питома робота деформування будуть найменші. Із вище приведеного, можна зробити припущення, що форма поперечного перерізу включень евтектики $Ti - TiB_n$ при активній течії металу будуть приймати форму круга або еліпса (в залежності від напружено деформованого стану основного металу). Металографічні дослідження показали, що порушення суцільності матеріалу, в тому числі на граничних поверхнях не спостерігаються.

Висновки

1. Виконано кінцево-елементне моделювання деформації елементарного об'єму КМ системи AL-Сталь з волокнами поперечний переріз яких має різну форму на розтяг за допомогою програмного комплексу Abaqus. По результатам моделювання було проаналізовано напружено-деформований стан КМ. Встановлено:

а) що в матеріалі матриці КМ виникає концентрація деформацій в зоні, яка розташована між волокнами, а величина цієї деформації залежить від форми поперечного перерізу волокна. Так при середній деформації елементарного об'єму 5% максимальна інтенсивність деформації матриці складає для волокон з перерізом круглої форми 14–16%, для ромбічної форми – 16–20%, а для квадратної форми – 20–30%. В наслідок цього питома робота деформування композиту з волокнами круглої форми менше, ніж з волокнами ромбічної форми 3–4% та з волокнами квадратної форми на 5–6%.

б) що в місцях матриці, які близькі до кутів поперечного перерізу виникає концентрація напружень. Внаслідок цього інтенсивність напружень в кутах прямокутного волокна досягають значної величини по відношенню до волокон круглої форми, що може приводити до їх наступного деформування.

2. Встановлено, що в місцях інтенсивних деформацій титанового сплаву з фазою евтектики TiB_n , а саме – в місці течії металу в порожнину матриці, структура матеріалу характеризується наступним:

- в наслідок великих ступенів деформації фазові включення подрібнюються;
- розподіл включень по об'єму сталей, на відміну від вихідної структури;
- орієнтація включень змінюється з хаотичної на спрямовану в напрямку течії основного матеріалу;
- форма включень змінюється з нерівнобісної на рівнобісну.

3. Перспективним напрямком розвитку досліджень є питання технологічної механіки процесу деформування евтектично зміцнених сплавів за схемою: зовнішнє навантаження → напружено-деформований стан елементарного об'єму → процес взаємодії армуючого компонента з матрицею → траєкторія руху армуючого компоненту за течією матриці → міцність з'єднання компонентів після виконання процесу.

Список літератури

1. Krivov G. Aircraft production and technology in former USSR – Kiev, 1998. – p.261.
2. Кривов Г.А., Титов В.А., Лупкин Б.В. и др. Конструкции из металлических композиционных материалов – К.: Техніка, 1992. –224 с.
3. Мануйлов В.Ф., Смирнов В.И., Галкин В.И. Расчеты процессов деформации композиционных материалов – М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
4. Титов В.А. Некоторые особенности технологической механики пластического деформирования конструкций из волокнистых композиционных материалов // Вестник НТУУ «КПИ», серия – Машиностроение. – К.,1998. –№33. – С.340–347.
5. Abaqus. Analysis User's Manual. Volume 3: Materials.
6. Abaqus. Analysis User's Manual. Volume 5: Prescribed Conditions, Constraints and Interactions.