

УДК 621.438.002.2

Титов В. А.
Лавриненков А. Д.
Злочевская Н. К.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИКИ ПОВЕДЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Одним из важнейших факторов повышений эксплуатационной надежности и ресурса современных изделий наукоемкого машиностроения является применение конструкционных материалов с высоким уровнем механических свойств [1]. Среди таких материалов особое место занимают композиционные материалы, в частности дисперсно-упрочненные материалы [2].

В работе [3] приведены технологические особенности изготовления заготовки лопатки компрессора газотурбинного двигателя из квазикомпозиционного материала на основе титанового сплава ВТ8 дисперсно-упрочненного эвтектикой TiB_n. В результате показано, что технологические режимы, которые влияют на качество готового изделия, отличаются от изотермического прессования заготовки лопаток из неупрочненного титанового сплава, например описанные в работах [4, 5]. Показано, что эти особенности связаны с наличием твердых дисперсных включений, которые взаимодействуют с основным металлом (матрицей) при пластическом деформировании, как это отмечалось в работах [6, 7]. При их взаимодействии происходит некоторое дробление и разворот дисперсных включений упрочняющего компонента в направлении течения металла матрицы при больших деформациях. Существенным вопросом при реализации таких процессов является обеспечение сплошности композиционного материала для полной реализации его прочностных свойств в изделиях.

Целью настоящей работы являлось изучение условий взаимодействия дисперсного включения (ДВ) с металлической матрицей в очаге деформации при изотермическом прессовании.

В процессе работы были поставлены и решены следующие задачи:

- постановка задачи численного моделирования деформирования ДВ в среде матрицы при изотермическом прессовании;
- анализ напряженного состояния металла матрицы на поверхности включения;
- исследования условий поворота ДВ в процессе течения металла в очаге деформации;
- формулировка выводов и рекомендаций.

Моделирование процесса прямого прессования заготовки с жестким включением было проведено методом конечных элементов. Схема процесса и конечно-элементная модель процесса показаны на рис. 1.

Геометрия заготовки и оснастки задавались двумерными – принята схема плоской деформации и объемного напряженного состояния.

В качестве основного материала заготовки - матрицы был принят титановый сплав ВТ8. В начальном положении заготовка 1 устанавливалась на угловую часть матрицы 2. Прямое прессование осуществлялось пуансоном 3, которому задавалось определенное перемещение U_y . При моделировании прямого прессования с противодействием на нижний торец задавалось действие контр-пуансона 4, к нижнему торцу которого прикладывается распределенное усилие q . Моделирование проводилось с условием упрочнения металла и трения на контактных поверхностях. Свойства основного материала заготовки из титанового сплава ВТ8 в исходном состоянии: модуль Юнга $E = 1,2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 300$ МПа, $\sigma_B = 700$ МПа [8]. Включение считалось абсолютно жестким по сравнению с основным материалом заготовки, так как модуль

Юнга жесткого включения на 3 порядка превосходил модуль Юнга основного материала заготовки и составлял $E = 2 \cdot 10^8$ МПа. Коэффициент трения контакта между заготовкой, пуансоном, контр-пуансоном и матрицей принимался $f = 0,08$.

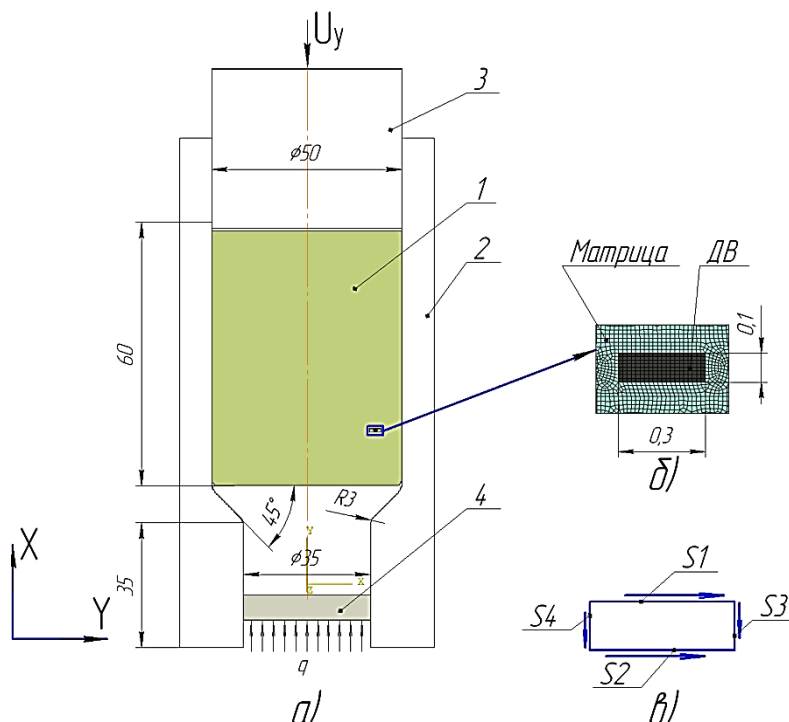


Рис. 1. Расчетная схема процесса прессования заготовки с единичным дисперсным включением, область деформирования которой разбита на сетку конечных элементов:

а – схема прессования в макрообъеме; б – ограниченная область окружения дисперсного включения (микрообъем); в – направления построения напряжения на поверхности дисперсного включения

Заготовка 1 и жесткое включение были разделены на 4 узловые изопараметрические конечные элементы. Поверхности матрицы 2, пуансона 3, контр-пуансона 4 считались абсолютно жесткими.

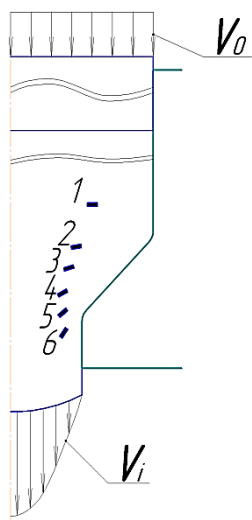


Рис. 2. Кинематика движения дисперсного включения прессования:

1, 2, 3, 4, 5, 6 – этапы движения ДВ в направлении прессования

Моделировалось неразрывность материалов на границе «основной металл-включение», путем задания механических свойств жесткого включения некоторому ограниченному объему основного материала заготовки.

Моделирование процесса прямого прессования проводилось в квазидинамической постановке, вместо скорости деформирования пуансону задавалось определенное перемещение. Решение квазидинамической задачи значительно уменьшает время расчета, без потери точности расчета.

Распределение напряжений на границе «основной металл – включение» строилось по следующим границам в направлениях, которые указаны стрелками на рис. 1, в.

В процессе изотермического прессования кинематика движения ДВ в очаге деформации показана на рис. 2. При движении металла в направлении прессования ДВ в зависимости от этапа

движения в очаге деформаций изменяет свое положение относительно направления деформирования. Это связано с изменением скорости движения металла V_i в очаге деформации, а также действующими напряжениями на граничной поверхности «основной металл-включение».

На рис. 3–6 показано распределение основных компонент тензора напряжений в микрообъеме на граничных поверхностях $S1$ и $S2$ включения на промежуточном этапе – 4. Компоненты напряжений σ_x и σ_y являются сжимающими. Их распределение по поверхностям $S1$ и $S2$ неравномерно.

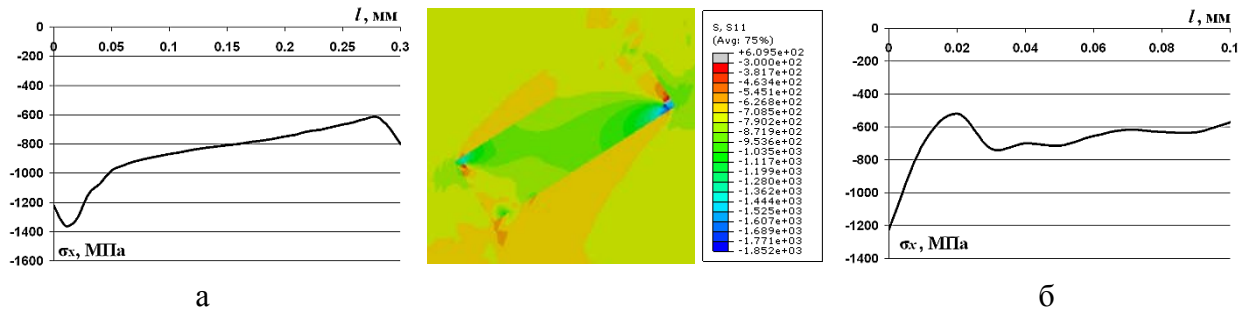


Рис. 3. Распределение напряжений σ_x на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)

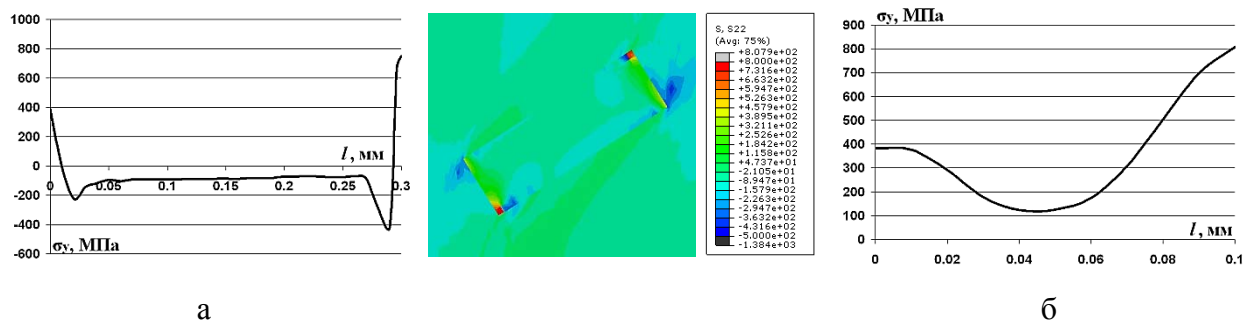


Рис. 4. Распределение напряжений σ_y на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)

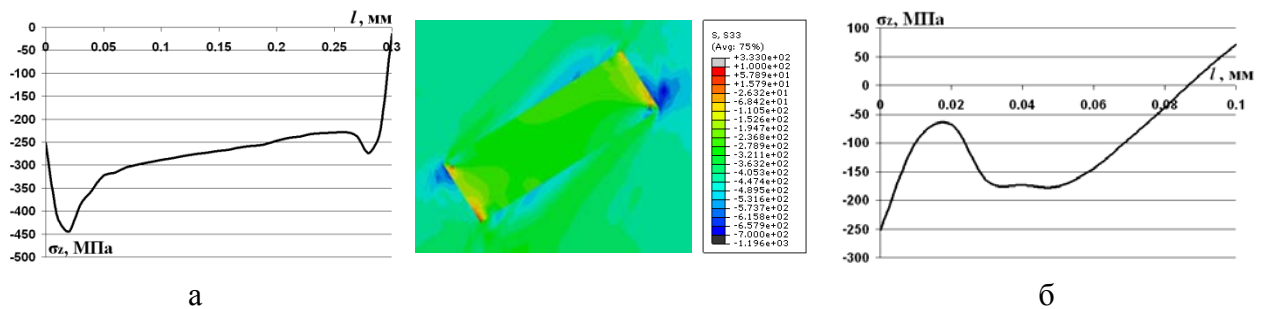


Рис. 5. Распределение напряжений σ_z на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)

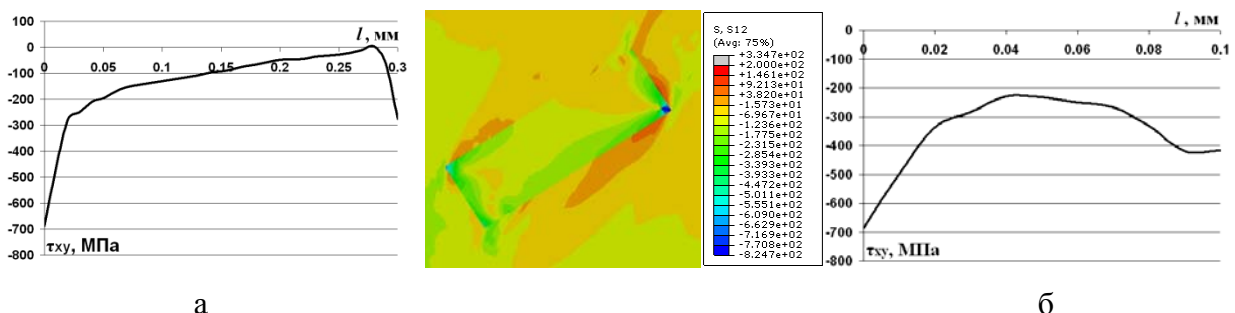


Рис. 6. Распределение напряжений τ_{xy} на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)

Эквивалентные результирующие силы от действия этих напряжений $F_i = \int_{S_1} \sigma_i ds$ приложены к поверхностям $S1$ и $S2$ на некотором расстоянии l_m и создают момент (рис. 7), результатом которого является поворот ДВ.

Поворот включения происходит в этом случае, если при течении металла имеется градиент скоростей перемещений материальных частиц в поперечном сечении очага деформаций, который создается градиентом напряжений σ_y в поперечном сечении в макрообъеме очага деформаций.

Ввиду того, что касательные τ_{xy} и σ_x нормальные напряжения на поверхностях $S1$ и $S2$ имеют высокий градиент, то это приводит к возникновению растягивающих нормальных напряжений σ_y на концах включений. Эти напряжения могут приводить к разрушению матрицы на граничной поверхности и отрыву металла матрицы от включения.

С другой стороны разрушению металла матрицы на граничной поверхности препятствует наличие сжимающих средних напряжений – первого инварианта напряжений на соответствующих концах поверхностей $S1$ и $S2$, а также на поверхностях $S3$ и $S4$, как это показано на рис. 8.

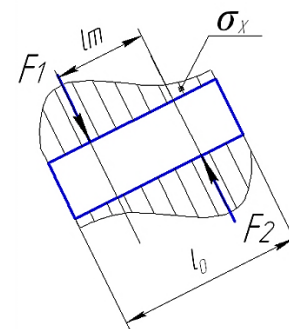


Рис. 7. К расчету момента сил, действующего на дисперсное включение в среде движущейся матрицы

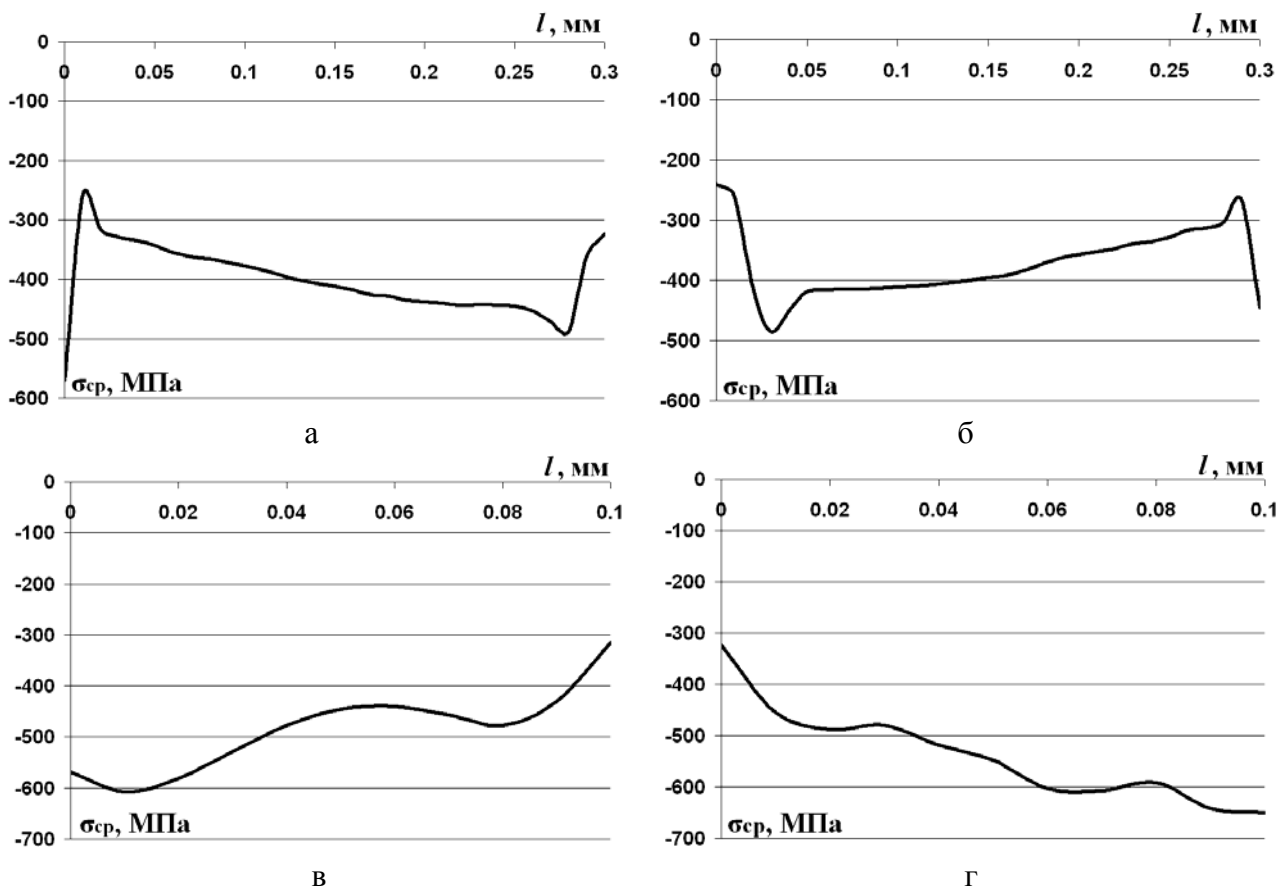


Рис. 8. Распределение величины среднего напряжения в материале матрицы на поверхностях:

а – $S1$; б – $S2$; в – $S3$; г – $S4$

Диаграммы пластичности для титановых сплавов [9, 10, 11] показывают, что увеличение среднего напряжения сжатия ведет к увеличению предельной пластической деформации разрушения металла. Поэтому учитывая, что на концах поверхностей $S1$ и $S2$, в зоне действующих растягивающих напряжений σ_y , наблюдается увеличение сжимающих средних напряжений, расчеты показывают, что разрушение в этой зоне не происходит.

На граничных торцевых поверхностях $S3$ и $S4$ также действуют сжимающие средние напряжения и сжимающие компоненты тензора напряжений. Это свидетельствует об устойчивости деформирования металла матрицы на этих граничных поверхностях.

В реальных условиях при формообразовании эвтектически упрочненных титановых сплавов при больших пластических деформациях происходит разрушение (дробление) эвтектики – боридов титана (TiB_n). При этом на раздробленном включении (TiB_n) появляются свободные поверхности [3]. В процессе горячей пластической деформации сжимающие напряжения на поверхности дисперсных включений способствует «залечиванию» образовавшихся микротрещин.

Увеличению средних напряжений сжатия способствует использование противодействия, как это показано на рис. 9.

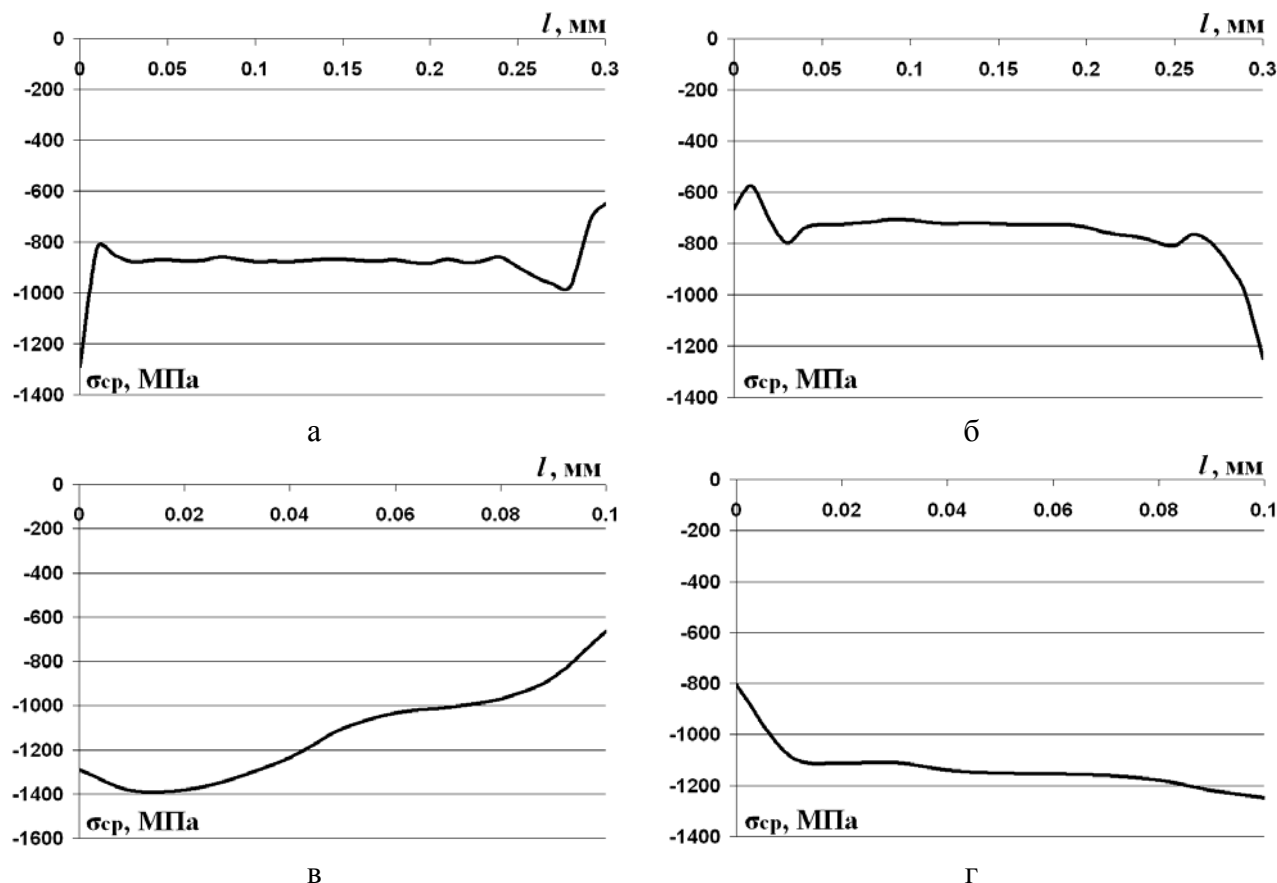
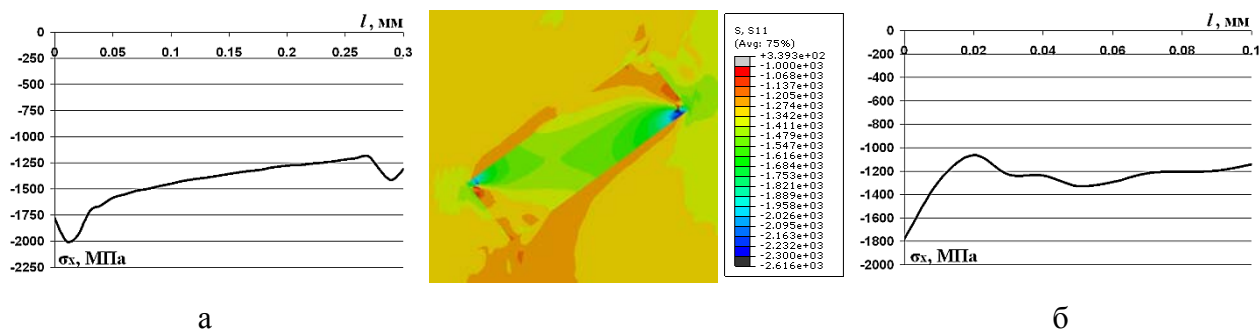
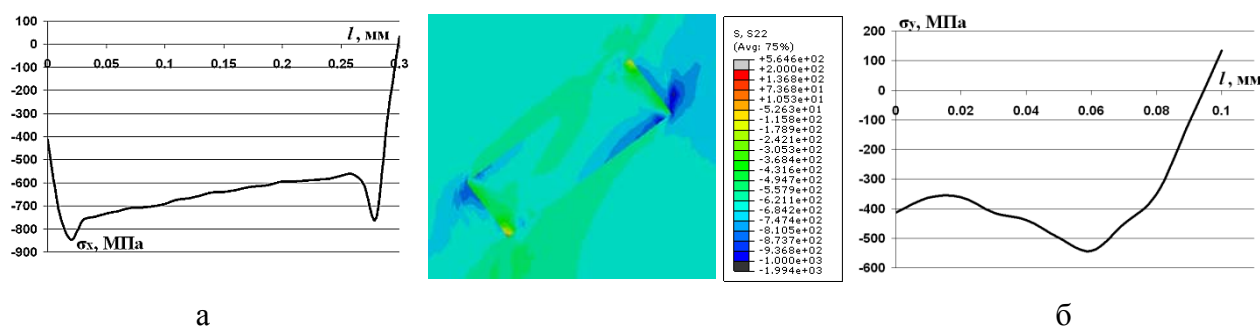
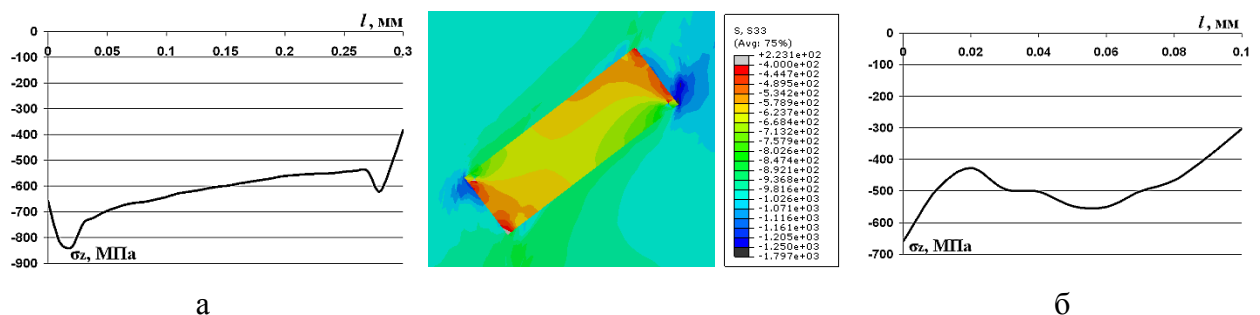
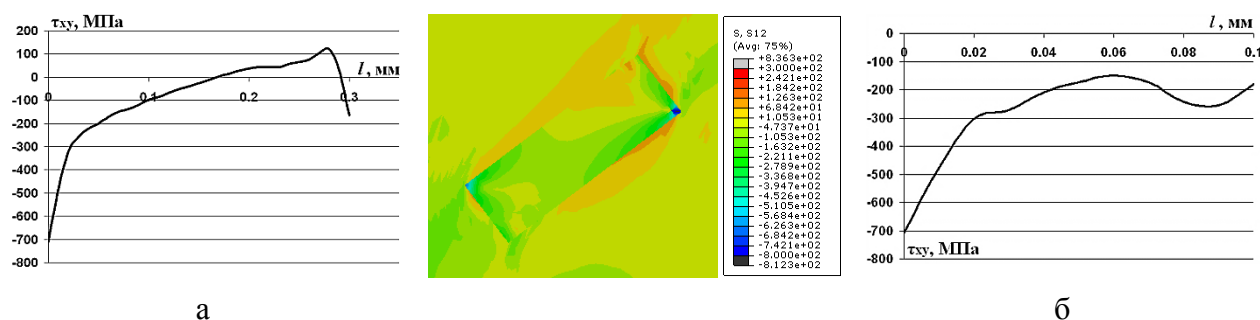


Рис. 9. Распределение величины среднего напряжения в металле матрицы на поверхностях: а – $S1$; б – $S2$; в – $S3$; г – $S4$

При создании противодействия величиной 600 МПа, величина среднего напряжения по поверхностям $S1$ и $S2$ увеличивается примерно в 2 раза и выравнивается по сечению включения. При этом среднее давление на торцах включения (поверхности $S3$ и $S4$) увеличивается более интенсивно – в 2,2–2,3 раза.

Наряду со средним напряжением, увеличивается степень сжатия и по отдельным компонентам тензора напряжений на поверхностях включения в процессе деформирования с противодействием, как это показано на рис. 10–13. При этом на поверхностях включения, практически, отсутствуют зоны растягивающих напряжений.

Рис. 10. Распределение напряжений σ_x на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)Рис. 11. Распределение напряжений σ_y на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)Рис. 12. Распределение напряжений σ_z на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)Рис. 13. Распределение напряжений τ_{xy} на границах $S1$ (а) и $S3$ (б)

В результате численного моделирования обоснован механизм переориентации в направлении течения металла твердых армирующих включений, которые характерны для квазикомпозиционных эвтектически армированных материалов. Это совпадает с экспериментальными данными работы [3].

Предварительный анализ напряженного состояния при взаимодействии металла матрицы (титанового сплава ВТ8) с включением (эвтектики TiV_n), показывает, что при использовании противодавления улучшаются условия взаимодействия на граничной поверхности включения и матрицы, уменьшается вероятность развития микротрещин, а проведение процесса в условиях горячей пластической деформации создает условия для «залечивания» уже имеющихся микротрещин.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены условия взаимодействия дисперсного включения с металлической матрицей в очаге деформации при изотермическом прессовании, управление которыми позволяет обеспечить сплошность композиционного материала для полной реализации его прочностных свойств в изделиях.

Установлен механизм поворота включения в направлении течения металла в зависимости от градиента скоростей перемещений материальных частиц матрицы, который создается градиентом напряжений в поперечном сечении. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Показано, что на границе поверхности «включение – матрица» действуют средние напряжения сжатия, которые препятствуют разрушению металла. Величина средних напряжений увеличивается при использовании противодавления. Выполнение формообразования в изотермических условиях способствует «залечиванию» микродефектов, которые могут образоваться при дроблении армирующих компонент.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкции из металлических композиционных материалов / Г. А. Кривов, В. А. Титов, Б. В. Лупкин [и др.]. – Киев : Техніка, 1992. – 224 с.
2. Вишняков Л. Р. Композиционные материалы : справочник / Л. Р. Вишняков, Т. В. Грудина, В. Х. Кадыров [и др.]; под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев : Накова думка, 1985. – 592 с.
3. Особливості процесів формоутворення заготовок лопаток з титанового сплаву системи $Ti - TiB_n$ / В. А. Тітов, О. Я. Качан, О. Г. Моляр, Ю. С. Кресанов, Н. К. Злочевська // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – 2011. – № 61. – С. 95–101. – (Серия «Машиностроение»).
4. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество их изготовления / Ю. С. Кресанов, А. Я. Качан, В. В. Чигиринский [и др.] // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2009. – № 2. – С. 108–115.
5. Тітов В. А. Дослідження параметрів процесу ізотермічного пресування заготовок з титанових сплавів / В. А. Тітов, Н. К. Злочевська, А. Д. Лавриненков, Т. Р. Гараненко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2011. – № 46. – С. 67–72.
6. Титов В. А. Моделирование процессов пластического деформирования композиционных материалов с учетом топологических особенностей структуры / В. А. Титов, Н. К. Злочевская, О. В. Алексеенко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – 2009. – № 2 (21). – С. 101–114.
7. Тітов В. А. Деякі особливості пластичного формування металевих композиційних матеріалів з армуючи ми компонентами довільної форми / В. А. Тітов, А. Д. Лавріненков, Н. К. Злочевська // Вестник НТУУ «КПИ». – 2010. – № 59. – С. 135–138. – (Серия «Машиностроение»).
8. Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
9. Пластичность и разрушение / Колмогоров В. Л. [и др.]. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.
10. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 175 с.
11. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.

Титов В. А. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;

Лавриненков А. Д. – аспирант НТУУ «КПИ»;

Злочевская Н. К. – ассистент НТУУ «КПИ».

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: v.a.titov@list.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2012 г.