

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.

Поэтому 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 $E = 1,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 300 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 700 \text{ МПа}$ [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 $E = 2 \cdot 10^8 \text{ МПа}$. Коэффициент трения контакта между заготовкой, пуансоном, контр-пуансоном и матрицей принимался $f = 0,08$.

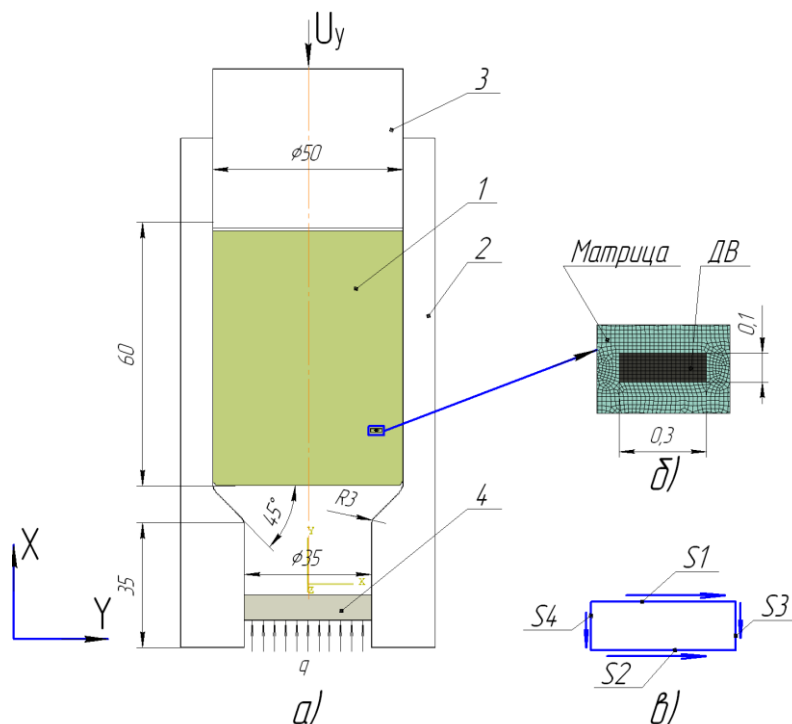


Рис.1. Расчетная схема процесса прессования заготовкой с единичным дисперсным включением, область деформирования которой разбита на сетку конечных элементов: а – схема прессования в макрообъеме; б – ограниченная область окружения дисперсного включения (микрообъем); в – направления построения напряжения 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.

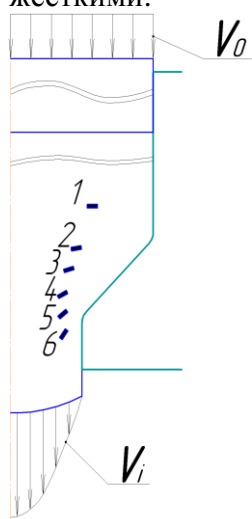


Рис. 2 Кинематика движения дисперсного включения прессования: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – этапы движения ДВ в направлении прессования.

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

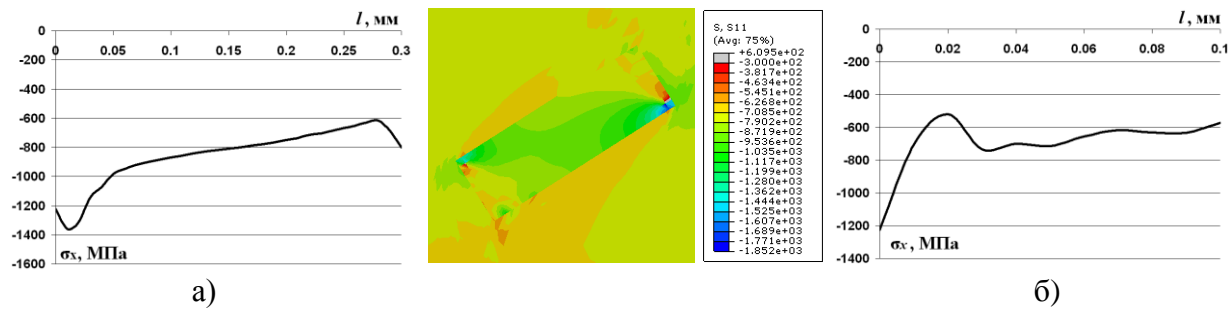
Моделирование процесса прямого прессования проводилось в квазидинамической постановке, вместо скорости деформирования пуансону задавалось определенное перемещение. Решение квазидинамической задачи значительно уменьшает время расчета, без потери точности расчета.

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

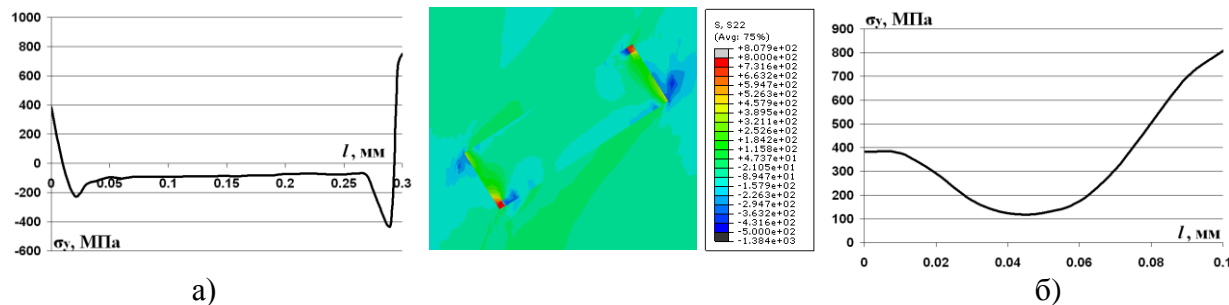
В процессе изотермического прессования кинематика движения ДВ в очаге деформации показана на рис. 2. При движении металла в

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”.

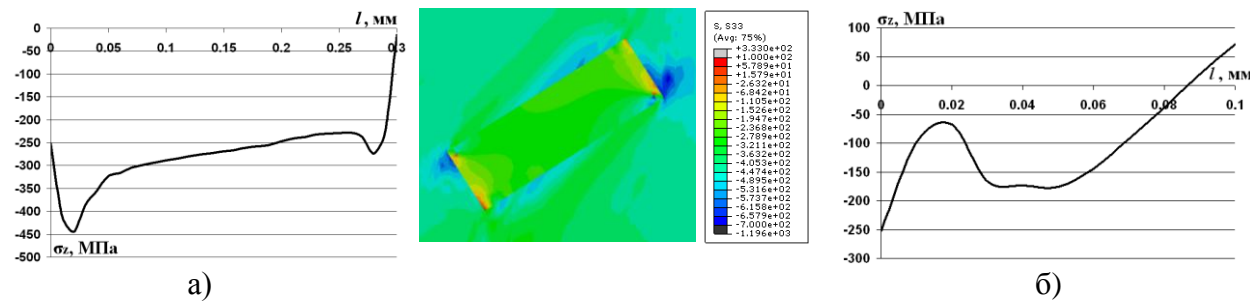
На рис. 3-6 показано распределение основных компонент тензора напряжений в микрообъеме на граничных поверхностях S1 и S2 включения на промежуточном этапе - 4. Компоненты напряжений σ_x и σ_y являются сжимающими. Их распределение по поверхностям S1 и S2 неравномерно.



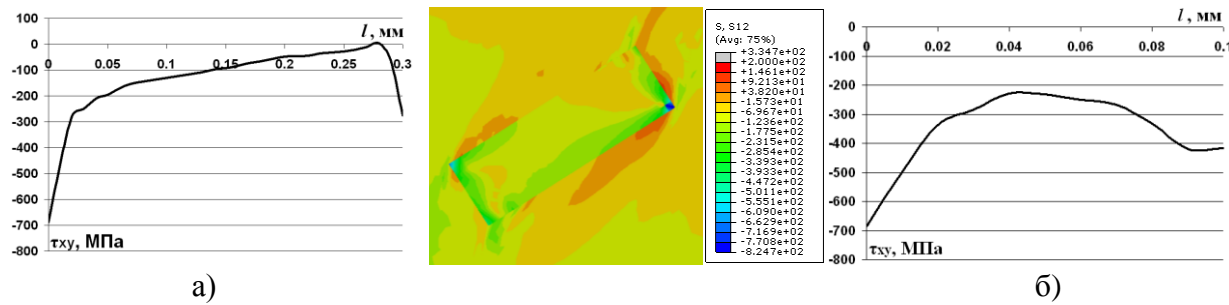
а) б)
Рис.3. Распределение напряжений σ_x на границах S1 (а) и S3 (б)



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



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



а) 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), результатам 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.

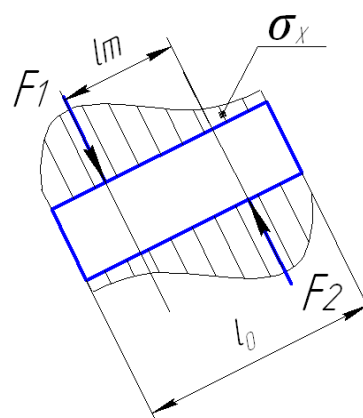


Рис. 7. К расчету момента сил, действующего на дисперсное включение в среде движущейся матрицы

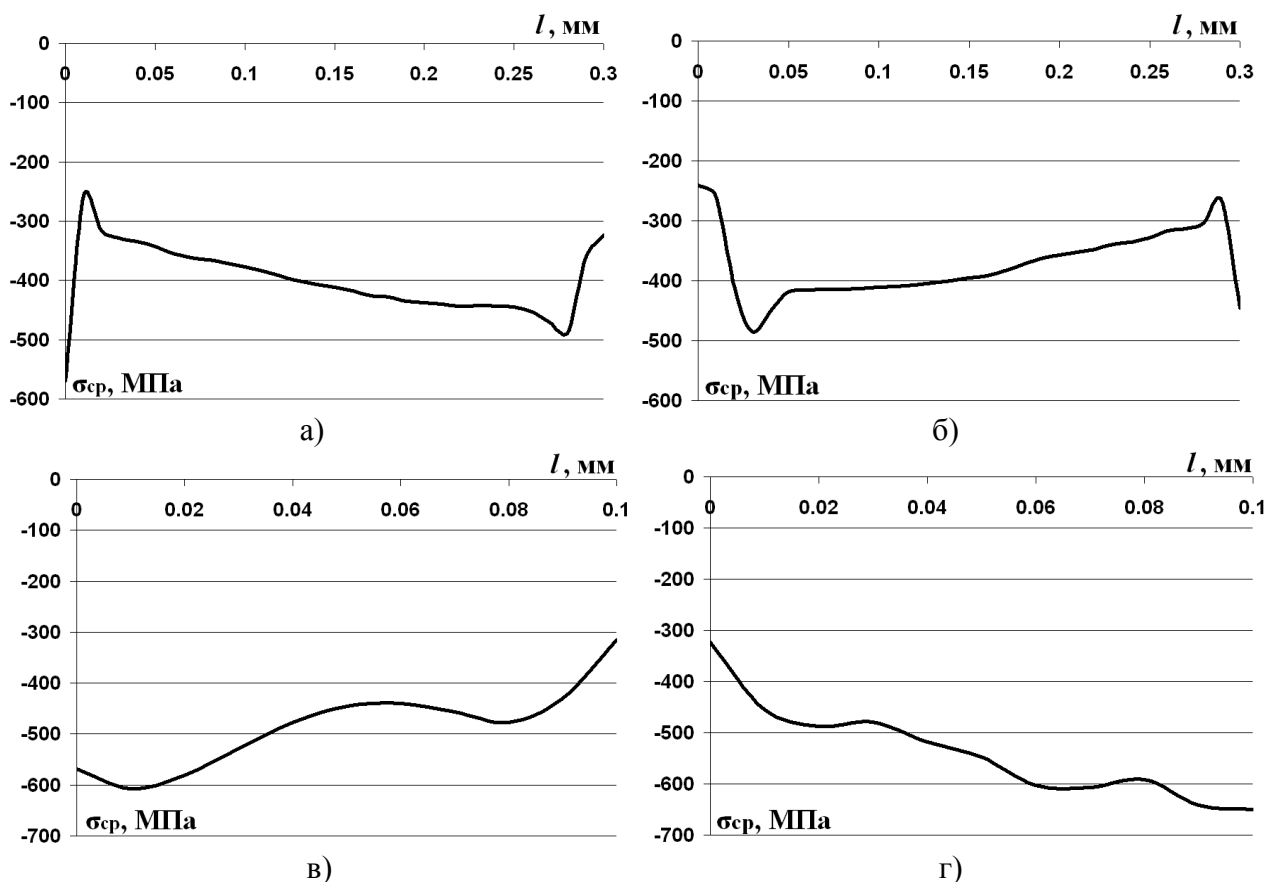


Рис. 8. Распределение величины среднего напряжения в материале матрицы на поверхностях: S1 – а), S2 – б), S3 – в), S4 – г)

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.

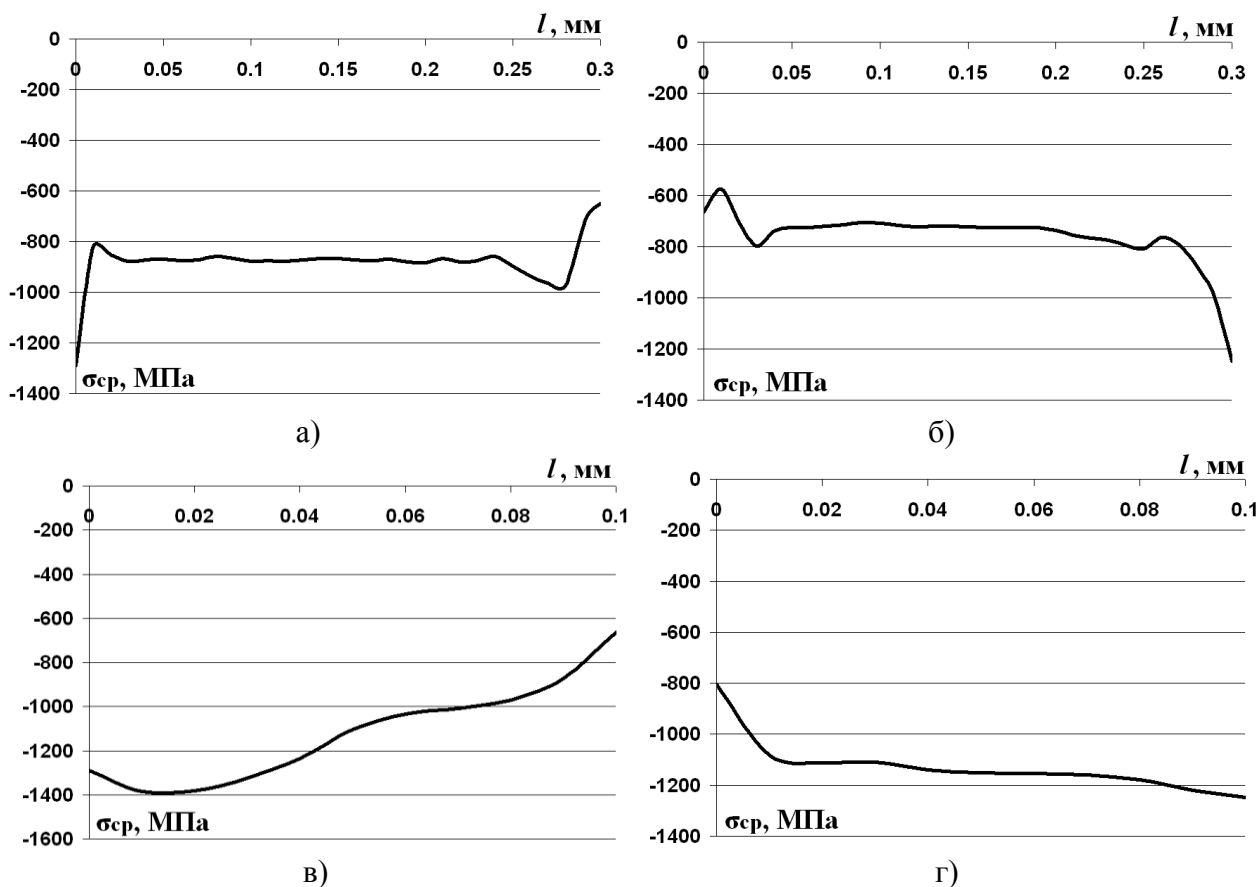


Рис. 9 Распределение величины среднего напряжения в металле матрицы на поверхностях: S1 – а), S2 – б), S3 – в), S4 – г)

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.

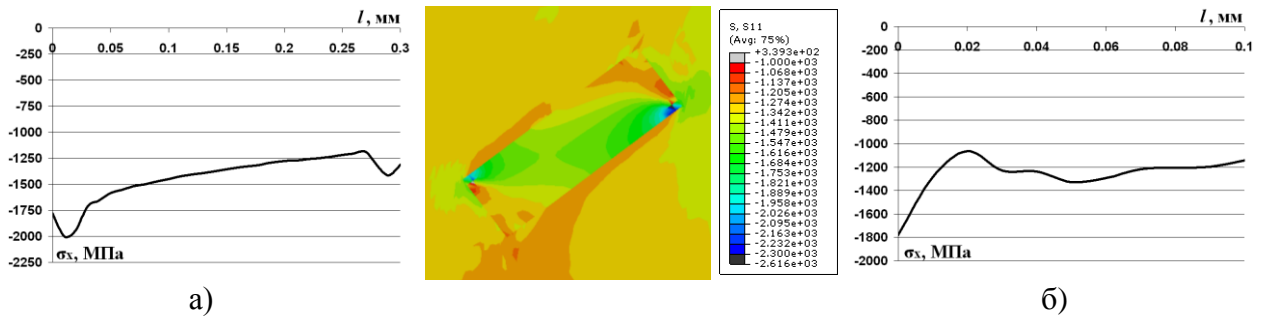


Рис. 10. Распределение напряжений σ_x на границах S1 (а) и S3 (б)

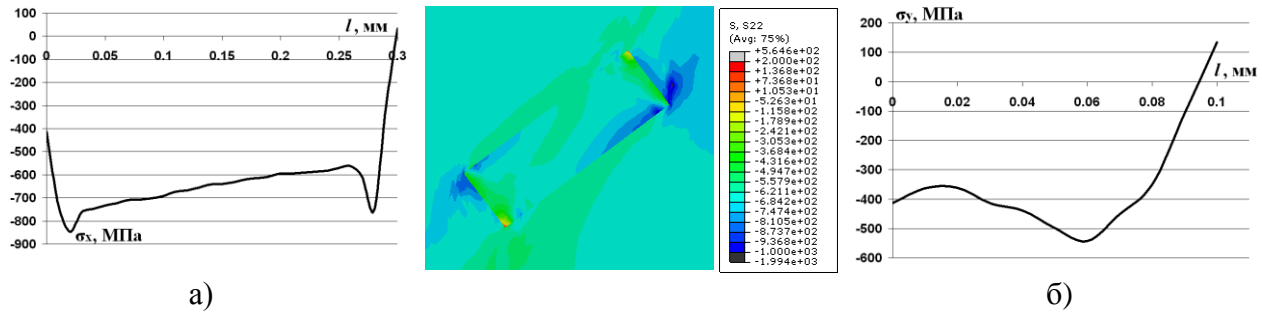


Рис. 11. Распределение напряжений σ_y на границах S1 (а) и S3 (б)

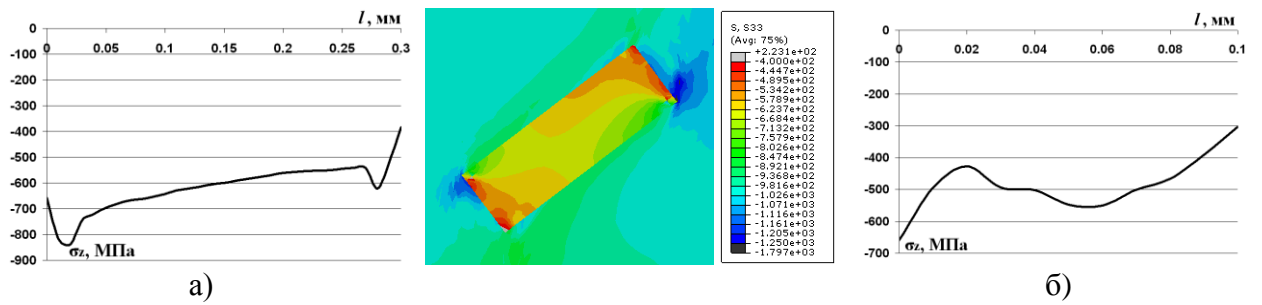


Рис. 12. Распределение напряжений σ_z на границах S1 (а) и S3 (б)

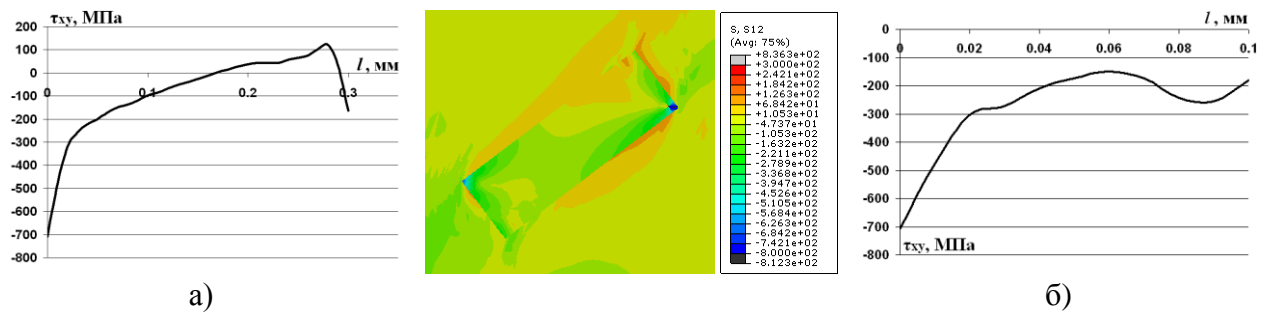


Рис. 13. Распределение напряжений τ_{xy} на границах S1 (а) и S3 (б)

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 TiB_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

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

2. 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.

3. 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривов Г.А. Конструкции из металлических композиционных материалов / Г.А. Кривов Г.А., 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. Тітов В.А. 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». Серия «Машиностроение». – 2011.-№ 61.-С. 95-101.
4. Кресанов Ю.С. 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 Сич, 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. - №2(21). – 2009. – 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”. Серия Машиностроение. – 2010. - №59. – С. 135-138.
8. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. 2-е издание / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. - М.: Металлургия, 1973. - 224 с.
9. Колмогоров В.Л. и др. Пластичность и разрушение. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.
10. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев: Вища школа, 1983. – 175 с.
11. Смирнов-Алиев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.

Титов В.А. - доктор технических 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