

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.Н. Паламарь, М.Л. Первов (РГАТУ)

Рассматривается проблема изучения особенностей деформирования композиционного материала, содержащего составляющие с различными значениями сопротивления деформированию. Предлагается метод автоматической оценки деформации композиционных материалов по изображению структуры композита, основанный на адаптации комплекса алгоритмов обработки изображения. Результаты расчета деформации материала по изображениям структуры, полученные автоматически с помощью ПО, сравнимы с результатами экспертной оценки, выполненной вручную.

Ключевые слова: композиционный материал, метод делительных сеток, исследование деформации, обработка изображения, автоматизация расчетов.

Проблематика исследования деформирования композиционных материалов

Для получения компактных заготовок из разнородных сплавов применяют различные методы обработки давлением: горячее и холодное прессование, спекание, совместную прокатку, а также другие виды обработки [1–3]. В процессе деформирования решается общая для этих методов задача обеспечения прочного соединения разнородных сплавов (слоев в биметалле, матрицы и волокна или дисперсных упрочняющих частиц в металломатричных композициях) и исследуются различные характеристики, влияющие на свойства деталей [4].

Деформирование разнородных металлов характеризуется тем, что в зону деформации поступают сплавы с различными характеристиками сопротивления деформированию, различными физико-химическими свойствами. Наличие в очаге деформации разнородных сплавов приводит к неравномерному распределению деформации между компонентами. Исследованию неравномерности деформации при изготовлении композиционных материалов посвящено большое число работ, в которых авторы исследуют влияние различных факторов на совместное деформирование гетерогенных материалов.

Деформация изотропного металла характеризуется большей или меньшей неоднородностью деформации, совместная деформация разнородных по свойствам сплавов характеризуется, как правило, большой неравномерностью деформации: слой с большей твердостью деформируется менее интенсивно, чем слой мягкого металла. Эта неравномерность в деформации слоев увеличивается при увеличении разницы в сопротивлении деформированию материалов слоев. На практике справедливо неравенство [3]:

$$\varepsilon_m > \varepsilon_{\text{общ}} > \varepsilon_t,$$

где ε_m , $\varepsilon_{\text{общ}}$ и ε_t — степень деформации мягкого слоя, общая деформация композиционного материала и степень деформации твердого слоя соответственно.

Неравномерность послойной деформации зависит от множества факторов, и данное соотношение выполняется не всегда. Так, при совместной прокатке стали 12X18 H10 и технического алюминия деформа-

ция слоев зависит от соотношения их толщин. При уменьшении толщины прослойки из алюминия разница в деформации слоев уменьшается и постепенно сходится на нет [5].

В общем случае неравномерность послойной деформации при совместном деформировании разнородных материалов будет зависеть от следующих факторов [3]: соотношения сопротивления деформированию материалов, соотношения толщин слоев и их расположения, величины и расположения межслойных сил трения, величины и направления контактных сил трения и параметров очага деформации.

При исследовании напряженного состояния упругой матрицы с учетом хаотического и регулярного заполнения объема композита круглыми жесткими включениями вводят понятие среднего гидростатического давления в очаге деформации. Величина среднего гидростатического давления позволяет определить направление перемещения линии раздела слоев при совместном деформировании многослойных металлов. Перемещение линии раздела слоев будет направлено от участков с большим гидростатическим давлением к участкам с меньшим гидростатическим давлением. Таким образом, наименьшая неоднородность деформации слоев будет наблюдаться при равенстве гидростатических давлений в слоях при их совместном деформировании. На величину среднего гидростатического давления будут оказывать влияние все вышеперечисленные факторы. Совместная деформация в условиях значительного межслойного трения слоев с различными значениями сопротивления деформированию вызовет появление дополнительных растягивающих напряжений в твердом слое, снижающих среднее гидростатическое давление, а сжимающие напряжения в мягком слое повышают гидростатическое давление в этом слое. Таким образом, можно прийти к заключению, что увеличение межслойного трения приведет к уменьшению неравномерности послойной деформации.

Неравномерность послойной деформации при разработке композиционного материала, состоящего из гранул различного химического состава, может сыграть как отрицательную, так и положительную роль.

В работе [6] исследован композиционный материал, состоящий из пластичной матрицы и распре-

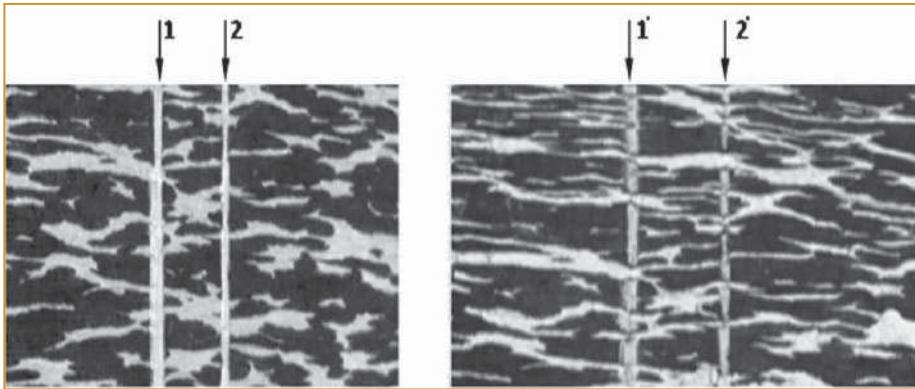


Рис. 1. Изображения структуры композиционного материала до (слева) и после (справа) обработки давлением с двумя делительными линиями

деленных в ней жестких включений круглой формы. Автор работы приходит к выводу, что неравномерное распределение жестких включений приводит к резкому усилению напряженности в незначительном объеме матрицы, а также к существенному увеличению объема матрицы, который характеризуется низкими значениями напряжений. В этом случае в формировании противодействия нагрузке активно участвует около 40% матрицы, а 60% вообще не нагружены. Напряженные участки матрицы в совокупности с частицами образуют сетчатую внутреннюю структуру. Таким образом, при нарушении равномерности в расположении включений разрыв происходит в перегруженных зонах матрицы. Поэтому необходимо стремиться к равномерному расположению включений в алюминиевой матрице.

Сплавы, состоящие из двух или более структурных составляющих с различными прочностными и физическими свойствами, в процессе пластической деформации отличаются неоднородностью деформации, которая приводит к концентрации деформации в структурной составляющей с меньшим значением напряжения текучести, в результате чего ресурс пластичности структурной составляющей исчерпывается, и она локально разрушается. Дальнейшее развитие трещины происходит за счет другой составляющей. Таким образом, в целом сплав имеет более низкую пластичность, чем его структурные составляющие по отдельности. При уменьшении соотношения сопротивлений деформации структурных составляющих пластичность сплава растет и достигает максимальной величины при равенстве значений напряжения текучести [5].

Постановка задачи

Свойства получаемого композиционного материала определяются и, соответственно, отражаются его структурой [7]. Методики анализа программного комплекса SIAMS 800 предназначены для автоматического распознавания и анализа элементов структуры и статистической обработки. Исследование деформаций, связанных с анализом сложных структур, данным комплексом не производится.

Изучение характера деформации и вычисление ее параметров выполняется по изображению структуры до и после деформации с помощью метода делительных сеток. Существуют специализированные программные комплексы, предназначенные для анализа различных процессов обработки металлов. Они позволяют провести полное моделирование материала и деформирующего воздействия на него или оценить изменения структуры на основе ручного выделе-

ния ее особенностей, в частности, узлов делительной сетки. К таким комплексам относится программный комплекс *DEFORM*, предназначенный для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением и термообработкой (<https://sapr.ru/article/7481>). Комплекс, состоящий из виртуального штампа, прессы, молота, прокатного стана, печи, позволяет проверить разработанный технологический процесс за компьютером. *DEFORM* позволяет выполнить полное моделирование материала и деформирующего воздействия на него или оценить изменения структуры на основе ручного выделения ее особенностей, в частности, узлов делительной сетки. Оценка деформации определенного композиционного материала выполняется оператором, следовательно, является трудоемкой и не обеспечивает повторяемость результата.

Таким образом, актуальной является задача разработки метода, и его программной реализации для автоматизированной оценки деформации по методу делительных сеток на основе автоматического анализа изображения структуры композиционного материала. В соответствии с методом делительных сеток на исследуемый образец механически наносят линии, которые служат системой меток для оценки деформации структуры [8]. Для исследования однонаправленной деформации материала достаточно использовать делительные линии, ориентация которых соответствует направлению деформирующего усилия прессы.

Изображение структуры композиционного материала с механически нанесенными двумя делительными линиями до (слева) и после (справа) деформации приведено на рис. 1. После деформации металла его структура меняется. Форма гранул изменяется, и расстояния между гранулами уменьшаются.

Метод делительных сеток предполагает расчет высоты темных и светлых участков вдоль делительной линии до и после деформации соответственно, например, 1 и 1' и/или 2 и 2'. О величине деформации судят по отношению высот соответствующих участков на структурах до и после деформации. Для оценки деформации необходимо рассчитать размеры участков между гранулами и самих гранул до дефор-

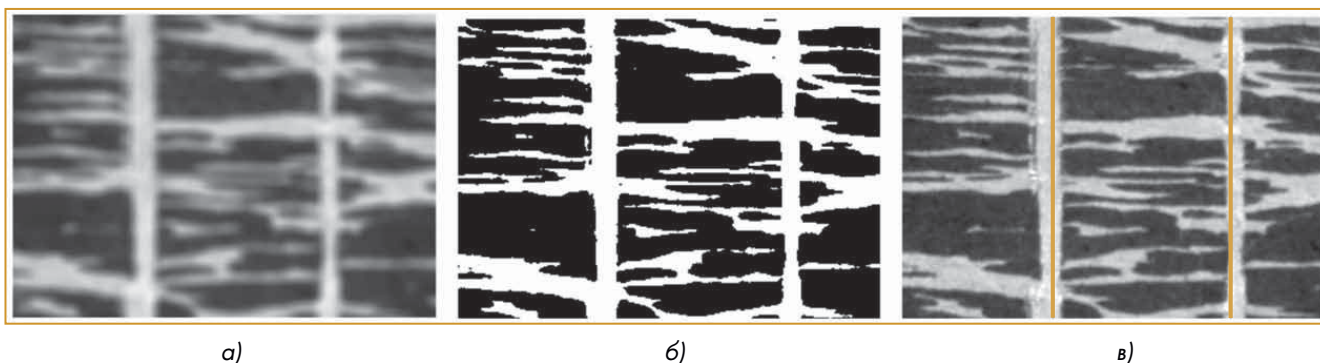


Рис. 2. Результаты обработки изображения структуры композиционного материала: размытие фильтром Гаусса (а), пороговая обработка (б), преобразование Хафа (в)

мации и после деформации, затем можно вычислить деформацию каждого участка. Оценка деформации каждого участка осуществляется по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{h_i - h'_i}{h_i},$$

где i — номер участка; h_i — участок на изображении до деформации, мм; h'_i — участок после деформации, мм.

Вычисления по изображению необходимо производить в реальных единицах измерения, для этого необходимо перевести полученные значения в пикселях в миллиметрах.

Метод автоматизации анализа структуры по изображению

Математическая модель обработки данных изображения включает предварительную обработку изображения, бинаризацию, поиск делительных линий на изображении структур, отделение гранул композиционного материала от фона пластической основы композита (матрицы), расчет степени деформации материала. Качество обработки изображения обеспечивается применением метода сегментации как системы вычислительных операций с высокой степенью организации и интеграции связанных способов обработки визуальных данных [9]. Предварительная обработка исходного изображения выполняется фильтром Гаусса. Для бинаризации изображения используется адаптивная пороговая обработка. Делительные линии на изображении выделяются с помощью преобразования Хафа. Выделение гранул на фоне реализовано на основе адаптивной сегментации по контуру детектором границ Кэнни. Результаты преобразования фрагмента изображения структуры до деформации, полученного с помощью микроскопа, представлены на рис. 2. Результат нахождения линий преобразованием Хафа совмещен с исходным изображением фрагмента структуры.

Для подавления шумов на изображении используется фильтр Гаусса, выполняющий размытие изображения по следующей формуле:

$$G_0(x, y) = A e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}},$$

где A — константа, μ — среднее значение (пик), σ — стандартное отклонение (по каждой из переменных x и y).

Для получения бинарного изображения пиксель сравнивается с пороговым значением. Если он превышает это значение, то результатом будет нуль (белый пиксель), иначе пиксель принимает значение единицы (черный пиксель).

Выделение границ методом Кэнни осуществляется в несколько этапов: изображение фильтруется фильтром Гаусса; находится градиент интенсивности изображения; осуществляется непрерывное подавление; вычисляется пороговое значение гистерезиса.

Для нахождения градиента интенсивности необходимо применить две сверточные маски в направлениях x и y по формуле, а затем найти силу и направление градиента функции яркости. К полученному изображению применяется непрерывное подавление. В результате удаляются пиксели, которые не считаются частью контура. Следовательно, остаются только тонкие линии (края-кандидаты). Завершающим этапом является пороговое значение гистерезиса. Кэнни использовал два порога (верхний и нижний):

- если градиент пикселя выше верхнего порога, пиксель принимается как граница;
- если значение градиента пикселя ниже нижнего порога, он отклоняется;
- если градиент пикселя находится между двумя пороговыми значениями, он будет принят, только если он принадлежит к пикселю, который находится выше верхнего порога.

При поиске линий алгоритмом Хафа линии можно представить формулой:

$$R = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta,$$

где R — длина перпендикуляра, опущенного на прямую из начала координат, θ — угол между перпендикуляром к прямой и осью OX , θ изменяется в пределах $0 \dots 2\pi$, R ограничено размерами входного изображения.

Через каждую точку (x, y) можно провести несколько прямых с разными R и θ , то есть каждой точке (x, y) соответствует набор точек в фазовом пространстве (R, θ) . Вводится сетка в пространстве (R, θ) , каждой ячейке соответствует набор прямых с близкими зна-

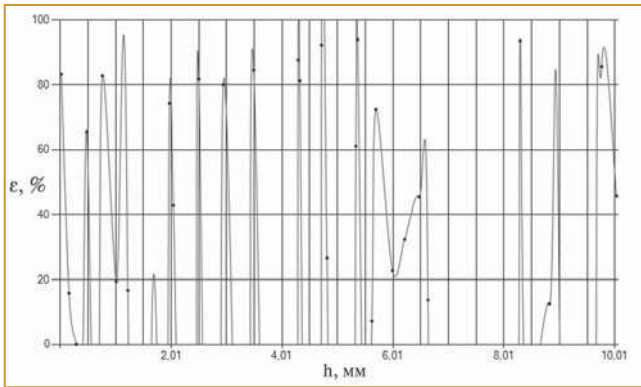


Рис. 3. График зависимости степени деформации от вида участка композиционного материала

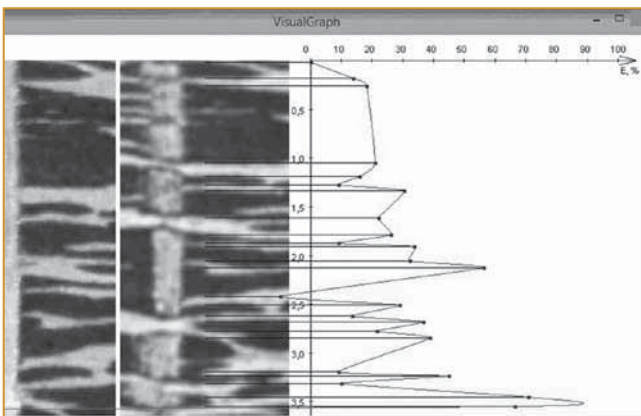


Рис. 4. Интерфейс графика с наложением на изображения структур композиционного материала

чениями R и θ . С изменением размера сетки меняется и число найденных прямых.

Экспериментальные расчеты по оценке деформации

По найденным делительным линиям выполняется оценка деформации. Рассчитывается длина участков, соответствующих составляющим композиционного материала, вдоль делительной линии. Измерения выполняются по соответствующим участкам на изображении исходного материала и на изображении деформированного материала. Вид графика, отражающего степень деформации на определенном участке структуры, показан на рис. 3. Размер участка на графике соответствует реальному размеру на образце материала.

Из рис. 4 видно, что распределение деформации очень неравномерно, что объясняется разностью сопротивлений деформации материалов основы (темный цвет) и наполнителя (светлый фон). Кроме того, на деформацию компонентов композиционного материала оказывает их толщина.

Для удобства исследования деформации выполнена визуализация путем автоматического сопоставления графика зависимости степени деформации с изображением деформированного образца. На рис. 4 представлен интерфейс графика с наложением на изображения до и после деформации.

Совмещение визуального представления композиционного материала и графика распределения деформаций позволяет выполнить анализ влияния его структуры на особенности деформации исследуемого материала.

Результаты автоматического расчета деформации заносятся в таблицу и могут быть сохранены в текстовом файле, связанном по названию с исследуемыми образцами, что позволяет организовать хранение результатов расчетов. Вид текстового файла представлен на рис. 5.

Результаты автоматического расчета были сопоставлены с расчетами, выполненными вручную. Для выполнения ручных расчетов были сделаны снимки структуры с помощью микроскопа с трехсоткратным увеличением. После получения увеличенных фотографий образца с микроскопа до деформации, была произведена деформация образца в гидравлическом прессе с усилием 9 т. В результате деформации размер образца уменьшился с 21,8 мм до 17,4 мм. Фотографии образца, сделанные с помощью микроскопа и склеенные вручную с помощью графического редактора, представлены на рис. 6. На изображение нанесены значения толщины структурных участков композиционного материала, полученные вручную.

Полученные графики деформации по расчетам, выполненным вручную, соответствуют графику, представленному на рис. 4. При этом ручной расчет имеет сильные погрешности за счет склеивания изображений из-за ограничений поля зрения микроскопа. При автоматическом расчете по изображению точность измерений определяется dpi, установленным при получении изображения с помощью фотоаппарата.

Измерение размеров участков производилось с помощью шкалы с ценой делений 0,01 мм, что тоже внесло погрешности. При измерении размеров программой отсутствовали погрешности склеивания изображений, и расчет производился по пикселям, каждый из которых составлял 0,0087 мм для данных снимков, что на порядок точнее, чем шкала 0,01 мм. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что расчет деформации с помощью программы получился точнее.

Часть результатов ручного расчета представлена в таблице. Номер i_m мягкого и i_t твердого участка обозначен номерами двух точек по границе контакта материалов.

result.txt — Блокнот			
№	До, мм	После, мм	ε, %
01-02	00,02	00,02	000,00
02-03	00,19	00,17	013,64
03-04	00,10	00,08	018,18
04-05	01,00	00,79	020,87
05-06	00,17	00,14	015,79
06-07	00,10	00,09	009,09
07-08	00,09	00,06	030,00
08-09	00,36	00,28	021,95
09-10	00,23	00,17	025,93
10-11	00,10	00,09	009,09
11-12	00,05	00,03	033,33
12-13	00,22	00,15	032,00

Рис. 5. Вид текстового отчета с результатами расчета

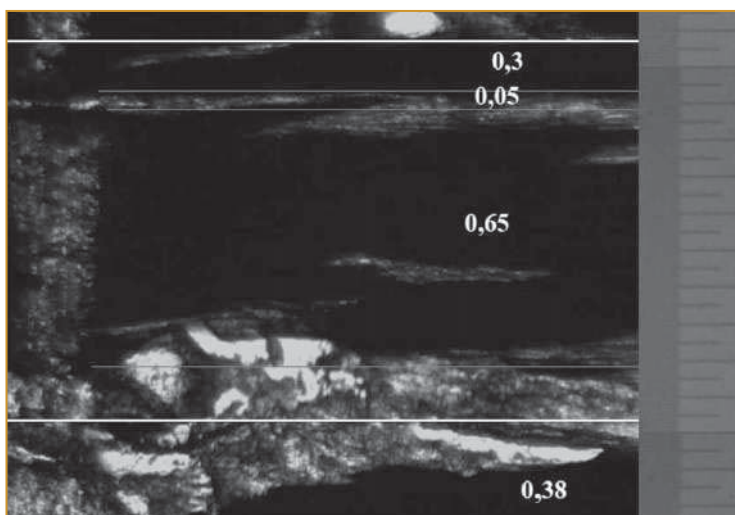


Рис. 6. Фотография деформированного образца с микроскопа

Таблица. Результаты ручного расчета

i_M	h_M	h'_M	e	i_T	h_T	h'_T	e
1-2	0,07	0,06	0,14	2-3	0,13	0,10	0,23
3-4	0,06	0,05	0,17	4-5	0,39	0,33	0,15
5-6	0,10	0,08	0,20	6-7	0,21	0,17	0,19
7-8	0,11	0,06	0,45	8-9	0,07	0,08	-0,14
9-10	0,15	0,12	0,20	10-11	0,56	0,43	0,23
11-12	0,27	0,22	0,19	12-13	0,26	0,22	0,15

Необходимо отметить, что на графике есть участки, где деформация получилась меньше нуля. Это связано с тем, что некоторые участки после деформации слились в один большой участок. Эта проблема должна быть преодолена разработкой соответствующей методики для оценки деформации при нарушении топологической связности структурных составляющих материала.

Заключение

Разработанный метод сегментации и способы его реализации обеспечивают высокую организацию системы анализа изображения. Повышение организации системы, то есть совокупности взаимосвязей частей системы в контексте ее функционирования, обеспечивается следующими характеристиками процесса сегментации:

— интеграция системы сегментации со вспомогательными способами анализа исходных данных и описания объектов анализа;

Паламарь Ирина Николаевна — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительные системы»,
Первов Михаил Леонидович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Мехатронные системы и процессы формообразования им. С.С. Силина» Рыбинского государственного авиационного технического университета (РГАТУ) им. П.А. Соловьева.
 E-mail: irina.palamar@mail.ru mpervov@mail.ru

— универсальность обработки за счет возможности адаптации системы к особенностям структуры материала;

— высокая управляемость за счет изменения управляющих параметров процесса сегментации;

— унификация алгоритмов, используемых для реализации различных вычислительных процессов.

Программная реализация метода позволяет получить оценку деформации в любом сечении, построить график изменения деформаций мягкого и твердого материалов, а также получить таблицу расчетов значений деформации в текстовом формате. Такие возможности позволяют повысить точность оценки деформации и предоставить инструментальные средства для исследования поведения материалов, составляющих композиционный материал. В результате повышается эффективность создания новых материалов с заранее заданными эксплуатационными свойствами.

Список литературы

1. Композиционные материалы. Справочник. Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев. Наукова думка. 1985. 592 с.
2. Мамаев В.Б., Первов М.Л. Учет сил контактного трения при объемной штамповке // Вестник машиностроения. 2016. № 3. С. 74 - 78.
3. Колпашиников А.И., Арефьев Б.А., Мануйлов В.Ф. Деформирование композиционных материалов. М.: Металлургия. 1982. 248 с.
4. Popov V.A. Examination of Non-Agglomerated Nanodiamonds Inside Aluminum Matrix Composites by Synchrotron Radiation // In: Zacharie Bartul and Jérôme Trenor (Eds.) «Advancers in Nanotechnologies». Nova Science Publishers. New York. 2016. P. 185 - 202.
5. Балахонцев Г.А., Барбанель Р.И., Бондарев Б.И. и др. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справ. изд. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия. 1985. 352 с.
6. Король В.К., Гильденгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. М.: Металлургия. 1970. 236 с.
7. Первов М.Л., Конкевич В.Ю. Композиционный материал для наплавки поршней // Технология легких сплавов. № 1. 2011. С. 44 - 48.
8. Дель Г.Д., Новиков Н.А. Метод делительных сеток. М.: Машиностроение. 1979. 144 с.
9. Palamar I. N., Sizov P.V. A method of image segmentation with the help of areas growing and multiscale analysis // Vestnik. Scientific Journal of Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk. 2010. № 7. P. 111 - 116.