



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.14

УДК 531/534: [57+61]

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОФОРМОВКИ SS316L КАК МАТЕРИАЛА ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

М.Н. Богар, О. Кулкарни, Г. Какандикар

Технологический институт Махараштры, Пуна, Индия

### О СТАТЬЕ

Получена: 07 июля 2023

Одобрена: 10 декабря 2023

Принята к публикации: 11 декабря 2023

### Ключевые слова:

микроформовка, тест Накаджима, SS316L, FLC, микроструктура

### АННОТАЦИЯ

Процесс придания плоским металлическим листам необходимой формы без каких-либо изъянов называется производством листового проката. В настоящее время в связи с популярностью миниатюризации во многих отраслях промышленности растет спрос на микроизделия и микроустройства. Метод производства, известный как микроформовка, позволяет создавать миниатюрные компоненты для различных инженерных целей. Микроформовка применяется в различных областях, включая автомобильную, биомедицинскую и аэрокосмическую технику. Если в процессе микроформовки толщина листового материала соответствует его длине, то поведение при деформировании отличается от ожидаемого для макроскопического листового материала. Способность материала к формообразованию является одним из важнейших процессов, а одним из важнейших параметров, определяющих формоустойчивость материала, является кривая предельного формообразования или, как ее еще называют, диаграмма предельного формообразования. Целью данного исследования является построение предельной кривой формования для конкретного биоматериала с помощью численного моделирования и эксперимента. Для определения предельных кривых формования в настоящем исследовании проведен контролируемый эксперимент с тонким листом SS316L толщиной 60 мкм с различными углами относительно направлений прокатки (0°, 45°, 90°). В соответствии со стандартом ASTM-2218-14 испытание Накаджимы на микродеформацию проводится на образце с одноосной, одноосной промежуточной, плоской, двухосной промежуточной и двухосной траекториями деформации для измерения предельных деформаций. Предельная диаграмма для SS316L формируется с помощью численного программного обеспечения *Simufact Forming V15*, после чего полученные результаты сравниваются с результатами испытания по методу Накаджимы. Сравнение экспериментального метода с численным моделированием показало хорошее соответствие. Было выявлено, что кривые предела формования (FLC), полученные с помощью численного моделирования являются безопасными, а также на 5%-12% меньше, чем в экспериментальном методе. Для изучения физики формирования листа также проводятся микроструктурные исследования испытываемого объекта до и после формования. Микроструктурные исследования объясняют поведение материала в процессе формообразования.

© ПНИПУ

### Введение

Под формовкой листового металла понимается процедура приложения усилий к металлическому листу с целью придания ему требуемой формы. В процессе формовки лист может быть скручен, растянут, сформован и принимать сложные формы [13]. В процессе фор-

мования к материалу прикладывается усилие, вызывающее пластическую деформацию. Измененный лист может представлять собой разные фигуры. Листовая штамповка широко используется в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, производстве бытовой техники, биомедицине и во многих других об-

© Мохит Н. Богар – аспирант, e-mail: [mohitbogar10@gmail.com](mailto:mohitbogar10@gmail.com),

ID: 0009-0004-9882-6907

© Омкар Кулкарни – доцент, e-mail: [omkarkul9@gmail.com](mailto:omkarkul9@gmail.com),

ID: 0000-0003-2375-959X

© Ганеш Какандикар – профессор, e-mail: [kakandikar@gmail.com](mailto:kakandikar@gmail.com),

ID: 0000-0003-3120-4009





Рис. 1. Формовка листового металла

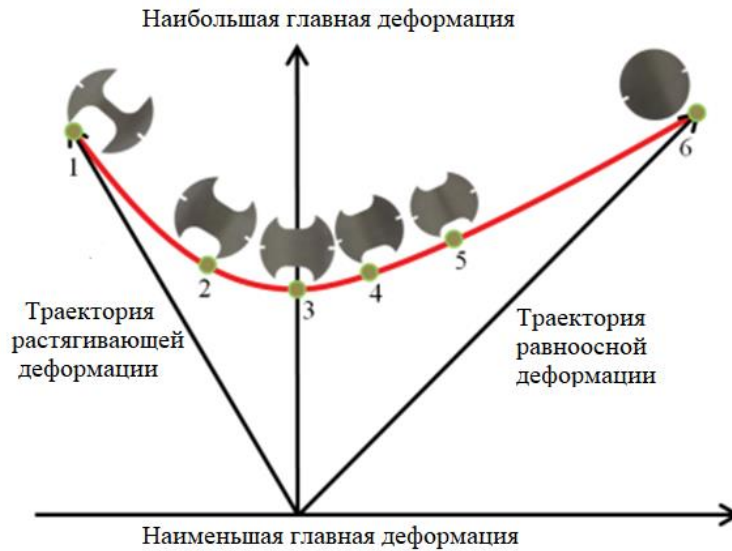


Рис. 2. Диаграмма кривой предельного формоизменения [17]

ластях промышленности, где требуется точная штамповка [8]. На рис. 1 описаны некоторые технологии формообразования металлов: глубокая вытяжка, вытяжка, резка, гибка и т.д.

### Микроформирование

Благодаря высокой производительности, большому коэффициенту использования материала и превосходным характеристикам метод микроформовки является перспективным способом изготовления микродеталей, особенно в области электроники, энергетики и медицины [8]. Масштаб собственной длины листового материала, используемого при микроформовании, может быть порядка одного размера листа. Наряду с другими механическими характеристиками листового материала на процесс формообразования будут влиять различные масштабные коэффициенты. Метод макроформовки и его параметры могут быть неприменимы непосредственно к процессу микроформовки из-за масштабного фактора [16]

Эффективный предел текучести металлического листа влияет на его формоустойчивость. Поскольку пластичность металлического листа ограничена, перед изготовлением деталей необходимо оценить специфическую формоустойчивость каждого материала. Такое ограничение не позволяет задавать произвольные размеры формируемых частей деталей. В результате необходимо использовать меру для оценки безопасного диапазо-

на значений деформации, ниже которого разрушение не произойдет [12].

Для характеристики формоустойчивости листового металла с целью предотвращения разрушения может быть использована диаграмма предельных деформаций, включающая безопасную, критическую и аварийную зоны. Диаграмма предельного формования является наиболее широко используемым критерием для прогнозирования формоустойчивости листового металла и вероятности успешного или неуспешного выполнения операций формообразования [12]. Ключевым инструментом для оценки формообразования листового металла является диаграмма предельного формования или кривая предельной деформации. Графическое изображение больших и малых деформаций в каждой точке детали представляет собой диаграмму предельного формования. Как показано на рис. 2, зеленые точки представляют собой деформации для кривой формования, а красная линия изображает пути деформации в кривой формования.

Для построения предельных кривых могут использоваться аналитические, численные и экспериментальные методы. Листовой металл имеет очень узкий диапазон толщин – от 0,1 до 5 мм, при этом большинство листов, используемых для формовки, имеют толщину менее 1,5 мм, следовательно, поверхностная деформация оказывает существенное влияние на измерение деформации. Измерение поверхностной деформации так-

Пределы прочности испытуемых сред

Элемент	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Co	P	S	C
Состав (%)	67,690	16,630	10,850	2,00	1,28	0,38	0,21	0,045	0,03	0,018

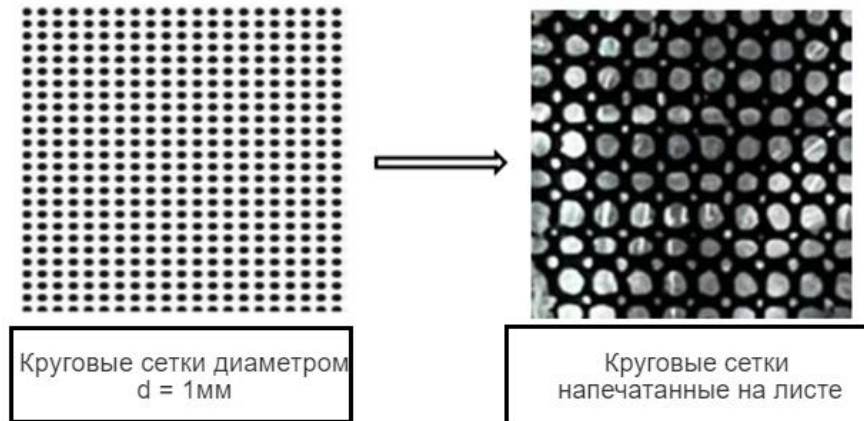


Рис. 3. Подготовка круговой сетки на образце SS316L [7]

же представляет собой сложную задачу. Для определения поверхностной деформации на лист наносят несколько рисунков сетки [21]. В силу своей простоты маркировка сеткой является одним из наиболее часто используемых методов измерения деформации для анализа деформации при листовой штамповке. Метод разметки сетки заключается в печати линейных шаблонов в требуемом месте на заготовке листового металла [13]. В экспериментальной методике на поверхность заготовки наносится сетка из маленьких кружков с межосевым расстоянием в том же диапазоне и диаметром 1–2 мм. В зависимости от маршрутов деформации в процессе формирования круги преобразуются в эллипсы. По этим эллипсам можно оценить большие и малые деформации, а если известны поверхностные деформации, то можно определить толщину, используя принцип постоянства объема [13]. Эксперимент «вне плоскости» (например, испытание Накаджимы), в ходе которого образец листового металла закрепляется в круглых штампах и растягивается с помощью полусферического пуансона, является одним из наиболее известных испытаний, позволяющих экспериментально получить диаграмму предельного формования. При всех вариантах деформирования обнаружено, что увеличение диаметра пуансона приводит к росту пластической деформации разрушения. Кроме того, пластическая деформация разрушения уменьшается с увеличением скорости деформирования [20]. Диаграмма предельного формования представляет собой кривую, на которой изображаются наибольшие и наименьшие деформации деформируемой детали, над которой происходит локальное разрушение шейки (небезопасная зона). Такая диаграмма строится при различных соотношениях деформаций, начиная от одноосного сжатия и заканчивая равноос-

ным растяжением.

При уменьшении размеров детали менее 1 мм возникает явление, известное как размерный эффект, в результате чего традиционные знания о процессе формообразования, как эмпирические, так и аналитические, оказываются неприменимыми в условиях микроформовки. Было предпринято много усилий, чтобы доказать, что поведение материала на микроуровне отличается от его поведения на макроуровне [10]. Поэтому целью данного исследования является проведение эксперимента на микроуровне, т.е. на толщине 60 мкм. Масштабные эффекты можно разделить на эффекты, основанные на плотности, эффекты, основанные на форме, и эффекты, основанные на текстуре. На последние две категории влияют микротрение, размер зерна, ориентация, толщина образца, геометрия инструмента, эффект пружины, эффект крупного зерна и многое другое, что еще предстоит выяснить [14]. Размер зерна материала оказывает существенное влияние на его формуемость. Большой или крупный размер зерна означает снижение формуемости. Идеальный размер зерна материала, находящийся в пределах 10–11 мкм, характеризуется более высокими показателями формуемости. Измерения размера зерна всех материалов показывают, что размер зерна находится примерно в одной области. Металлографический микроскоп используется для выявления дефектов на поверхности металлов, а также для оценки границ зерен, размера зерен и фазового анализа.

В данном исследовании предполагается продемонстрировать способность биоматериала – нержавеющей стали (SS316L) – к развитию с помощью одной из методологий исследования – кривой предельной деформации. Толщина используемого биоматериала составляет 60 мкм.

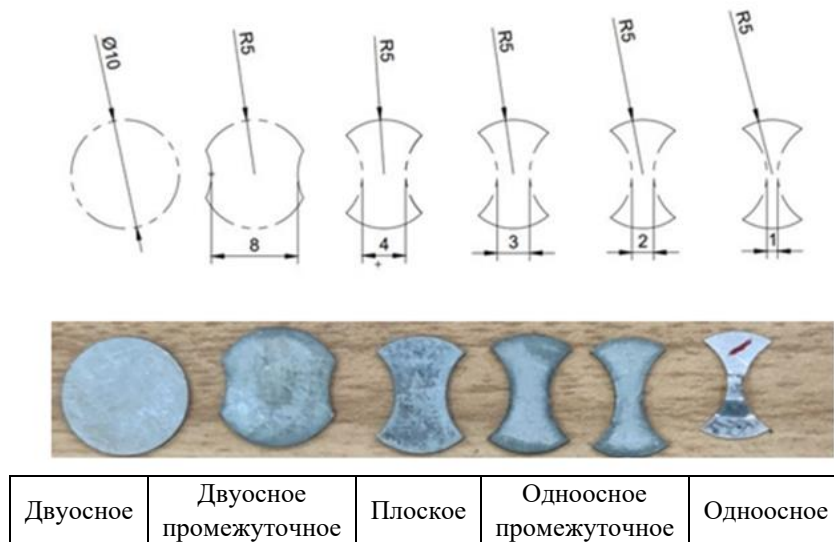


Рис. 4. Подготовка образцов: стандарт ASTM E2218-14

Кривые предельного формообразования строились с использованием стандарта ASTM-2218-14 «Стандартные методы определения кривых предела формирования» [19]. В качестве образцов использовались одноосные, одноосные промежуточные, плоские, двухосные промежуточные и двухосные траектории деформации. Разработана и создана экспериментальная установка для микроформовки. Испытания пределов формирования на листе SS316L толщиной 60 мкм проводились для трех различных ориентаций направления прокатки (0, 45 и 90°). По сравнению с направлениями прокатки 45 и 90° тонкая фольга при направлении прокатки 0° обеспечивает более высокую безопасную зону. Наименьшую безопасную зону фольга имеет при прокатке в направлении 90° [12]. Все три ориентации были выбраны для исследования влияния направления прокатки на формуемость. Аналогичным образом процедура была численно смоделирована с помощью программы *Simufact Forming*, и были построены предельные кривые для трех различных ориентаций направления прокатки (0, 45 и 90°).

## Материалы и методы

### Нержавеющая сталь

Для исследования влияния толщины образца на формообразующую способность аустенитной нержавеющей стали SS316L экономически целесообразно использовать лист толщиной 60 мкм. В табл. 1 приведен химический состав этого материала.

В качестве материалов для ортопедических имплантатов часто используются титановые сплавы, сплавы Co-Cr, а также сплавы нержавеющей стали. Нержавеющая сталь 316L стала одним из наиболее часто используемых биоматериалов в области имплантатов благодаря отличной коррозионной стойкости, приемлемым механическим свойствам, простоте изготовления и

доступной цене по сравнению с титановыми сплавами [18].

По сравнению с другими хромоникелевыми аустенитными нержавеющими сталями SS-316L имеет более высокое содержание молибдена, что повышает коррозионную стойкость. Нержавеющая сталь 316L уже давно является популярным сплавом в большинстве областей имплантации, включая сердечно-сосудистую, стоматологическую, ортопедическую и оториноларингологическую. Благодаря своей способности замещать функции твердых тканей она подходит для фиксации костей, например пластин, винтов, и искусственных суставов в ортопедической отрасли. Но также она применима и в других областях, таких как электроника, фармацевтика, автомобилестроение, медицинская имплантация например для замены тазобедренных и коленных суставов. Чем выше процентное содержание Cr, тем выше коррозионная стойкость, поэтому данный материал хорошо подходит для использования в биомедицинской промышленности.

### Подготовка образцов

Для создания образцов SS316L с круговой сеткой использовалась трафаретная печать, как показано на рис. 4. При таком подходе круговые сетки печатаются сразу на металлическом листе с помощью подходящей краски, устойчивой к процессу формования металла [2]. Созданный круг имеет диаметр 0,1 мм и межосевое расстояние между соседними кругами 0,2 мм. В процессе микроформовки эти круги деформируются до эллиптической формы; деформации контролируются в направлениях главной и малой осей для построения кривой предельной деформации [9]. Затем лист разрезается на нужные формы с помощью проволочно-вырезного электроэрозионного станка в соответствии со стандартом ASTM E2218-14. Проволочно-вырезной электроэрозионная обработка – это технология, обеспечивающая

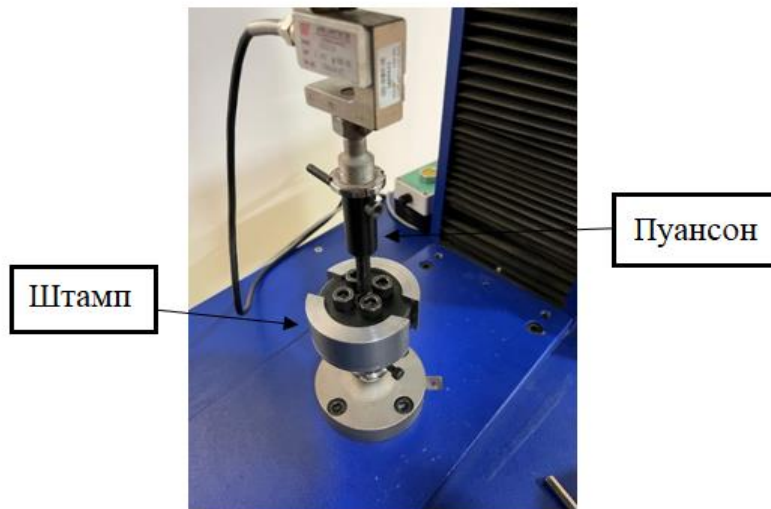


Рис. 5. Конфигурация экспериментального приспособления

превосходную точность и высокую эффективность обработки поверхности [11]. Машинный метод позволяет снизить общую концентрацию напряжений в материале [3]. Поскольку образец и так имеет небольшие размеры, любой другой способ получения формы в какой-то момент приведет к появлению области концентрации напряжений [1]. При концентрации напряжения в одном месте достижение результатов будет затруднено, поэтому применяется технология ЭО. Три из шести изготовленных образцов обеспечивают одноосное деформирование, плоское деформирование и двухосное деформирование, а остальные три – промежуточные между ними. Общий диаметр всех образцов составляет 10 мм. В настоящем исследовании образцы изготовлены в соответствии с тестом Накаджимы, как показано на рис. 4.

#### Экспериментальные исследования

На начальном этапе была сконструирована и собрана экспериментальная установка [6; 7]. Технологическая оснастка состоит из двух штампов – верхнего и нижнего, между которыми имеется полость, обеспечивающая установку прижимных пластин и место для заготовки. Уникальность конструкции этой установки заключается в том, что в набор штампов входит полусферический пуансон диаметром 4 мм, а в набор матриц – диаметром 4,5 мм. Для крепления верхнего и нижнего штампов используются болты. Прижимные пластины служат для удержания заготовки на месте. Заготовка помещается между прижимными пластинами и штампами. Для проведения испытания по методу Накаджимы вся оснастка устанавливается на универсальную испытательную машину с усилием 5,0 КН. На рис. 5 показана конфигурация этого приспособления. Во время исследований скорость перемещения траверсы составляет 2 мм/мин.

Стандарт *ASTM 2218-14*, т.е. эксперимент Накад-

жимы, проводился на шести отдельных образцах. На образцы была нанесена круговая сетка методом трафаретной печати, как показано на рис. 3. На этапе деформирования каждый образец перемещается в направлении образования единой трещины. При этом проводилось по три испытания для всех шести образцов каждого направления прокатки. За среднее значение принималось среднее между наибольшими и наименьшими главными деформациями по трем испытаниям. Для повышения точности измерений измерялись деформации в тех местах, где была видна трещина, с помощью видеоизмерительного устройства. Измерения проводились именно в тех местах, где произошло разрушение. Незначительные деформации можно было предвидеть путем оценки малой оси вблизи области шейки, тогда как большие деформации можно было предвидеть путем оценки главной оси. Большие и малые деформации определялись по простой формуле, которая определяет деформацию как отношение изменения длины к исходной длине. Это позволяет представить кривую предельной деформации материала. Эксперимент завершился на каждой из шести траекторий деформации (рис. 6). В купольной структуре образца имеется небольшая трещина, что явно свидетельствует о вязком разрушении.

#### Испытание на растяжение

Для исследования физико-механических характеристик материала необходимо проведение испытаний на растяжение. Результаты испытаний дают информацию о свойствах материала, включая предел прочности, удлинение, предел текучести, а также пиковую нагрузку. Эта информация должна быть предоставлена для ввода в программу моделирования при проведении численного анализа. Образец для испытания на растяжение разработан в соответствии со стандартом *ASTM E8/E8M - 13a* [15], (рис. 7).

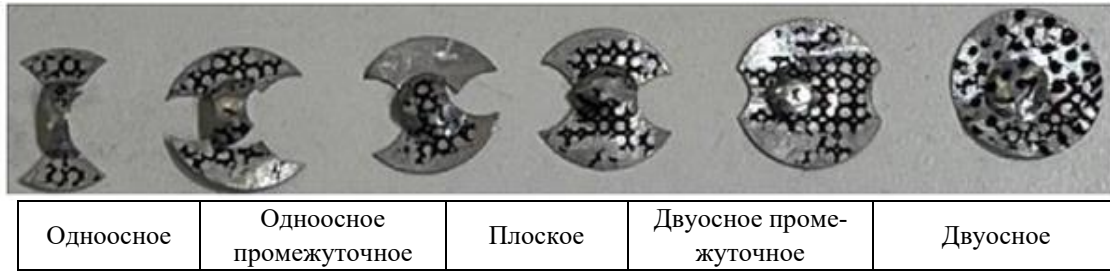


Рис. 6. Сформированные образцы после испытания по методу Накаджимы для всех вариантов деформации



Параметр	Образец наименьшего размера, мм
$G$ – длина измеряемой части	6
$W$ – ширина	$25,0 \pm 0,1$
$T$ – толщина	$6,0 \pm 0,1$
$L$ – общая длина	6
$R$ – радиус скругления	100
$A$ – длина уменьшенной части	32
$B$ – длина части сцепления	30
$C$ – ширина части сцепления	10



Рис. 7. Стандартный образец для испытания на растяжение в соответствии со стандартом *ASTM E8/E8M - 13a* [17]



Рис. 8. Испытание на растяжение тонкой фольги *SS316L*

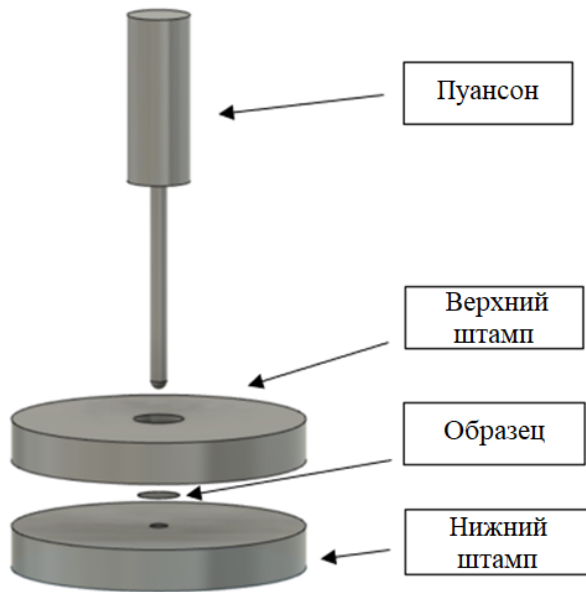


Рис. 9. CAD-модель экспериментальной установки

Для снижения концентрации напряжений при подготовке образцов к испытанию на растяжение используется ЭЭО. Испытание проводилось на универсальной испытательной машине с усилием 5,0 кН, оснащенной специальным приспособлением, разработанным для фиксации образца. Испытание на растяжение проводилось с постоянной скоростью 9 мм/мин. На рис. 8 показано проведение испытания на растяжение тонкой фольги *SS316L* толщиной 60 мкм. По результатам испытания были определены механические свойства материала.

## Численное исследование

### CAD моделирование

В CAD программе созданы модели технологической оснастки и заготовки. При проектировании пуансона, матрицы и образцов, использованных для эксперимента, применялась программа *Autodesk Fusion 360*. На рис. 9 показана CAD-модель экспериментальной установки.

### Конечно-элементное моделирование

С помощью препроцессора были описаны граничные условия и занесены в информационную базу данных. В качестве граничных условий используются линии симметрии или обрезанные кромки. Учитывались пластические деформации, так как при формообразова-

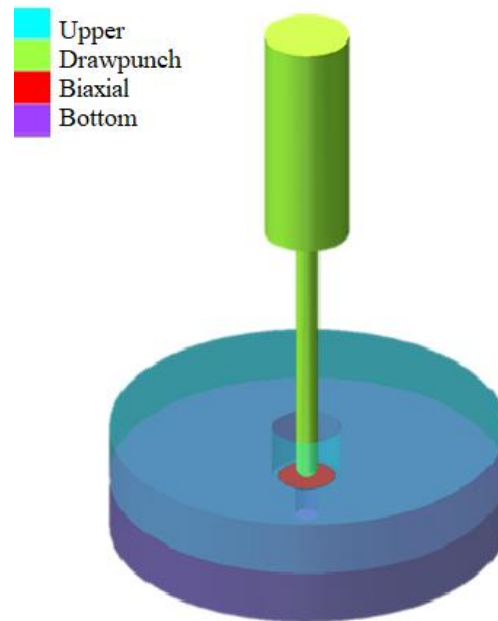


Рис. 10. КЭ-модель приспособления для двухосной деформации в направлении прокатки  $0^\circ$

нии всегда присутствует пластическая деформация. Применялись критерии вязкого разрушения. Параметры материала и данные, поступающие в программу, включая плотность, предел текучести, коэффициент Пуассона и критерий разрушения на кривых предела формования, были получены в результате испытаний на растяжение. В данном исследовании для численного моделирования использовалась программа *Simufact Forming*. Моделируемые траектории деформации включают двухосную, двухосную промежуточную, обычную, одноосную промежуточную 1, одноосную промежуточную 2 и одноосную. В базе данных *Simufact Forming* имеется широкий спектр материалов. С другой стороны, в базу данных могут быть введены новые материалы, заданные пользователем. В данном случае в качестве результатов учитывались как большие, так и малые деформации. На рис. 10 представлена КЭ-модель приспособления для моделирования траектории двухосной деформации в направлении прокатки под углом  $0^\circ$ .

Параметры испытания по методу Накаджимы для траектории двухосной деформации в направлении прокатки  $0^\circ$  представлены в табл. 2.

Аналогичным образом были созданы КЭ-модели других траекторий деформации во всех трех направлениях прокатки ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ), а граничные условия, свойства материалов образцов траекторий деформации, механические свойства и необходимая информация были использованы для численного моделирования в программе *Simufact Forming*.

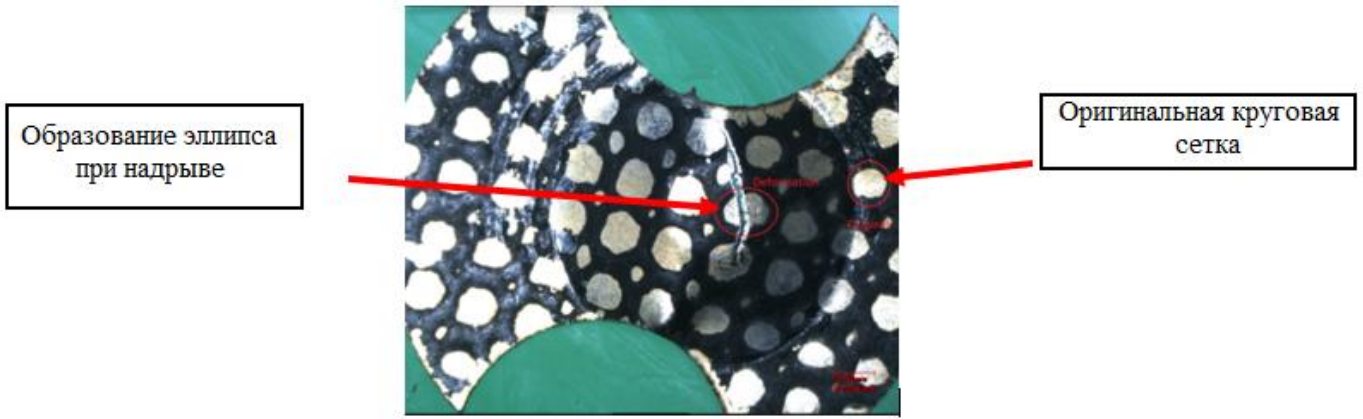


Рис. 11. Деформированный образец

Таблица 2

**Параметры испытаний для моделирования испытаний по методу Накаджимы**

Параметр	Значение
Диаметр полусферического пуансона	4,00 мм
Внутренний диаметр донного штампа	4,25 мм
Материал двухосного образца	SS316L
Толщина двухосного образца	0,06 мм
Скорость пуансона	2 мм/мин
Ход пуансона	1,62 мм
Коэффициент трения	0,1
Тип элемента	Шестигранная сетка
Размер заготовки	2 мм
Направление прокатки образца	0°

Таблица 3

**Экспериментальное измерение траекторий деформации**

Угол поворота	Образец	Минимальная главная деформация	Максимальная главная деформация
0°	Одноосный	-0,1479	0,4713
	Одноосный промежуточный I	-0,0970	0,3265
	Одноосный промежуточный II	-0,0692	0,2173
	Плоский	0,00459	0,1409
	Двухосный промежуточный	0,1113	0,3685
	Двухосная	0,1707	0,4692
45°	Одноосный	-0,1257	0,4644
	Одноосный промежуточный I	-0,082	0,3065
	Одноосный промежуточный II	-0,054	0,1623
	Плоский	0,00469	0,1099
	Двухосный промежуточный	0,1116	0,3385
	Двухосная	0,1711	0,4429
90°	Одноосный	-0,1235	0,4774
	Одноосный промежуточный I	-0,092	0,3061
	Одноосный промежуточный II	-0,0589	0,1573
	Плоский	0,00437	0,0809
	Двухосный промежуточный	0,1064	0,3285
	Двухосный	0,1693	0,4809



## Результаты и их обсуждения

На всех шести образцах были исследованы траектории деформации, а для оценки основных и малых деформаций использовалось видеоизмерительное устройство. Для каждого образца определяется место на графике, которое в конечном итоге позволяет определить кривую предельной деформации материала. При испытании по методу Накаджимы образец приобретает куполообразную форму, и на нем наблюдаются выступы.

На рис. 11 показано, как круглые точки на образцах превращались в эллипсы в момент разрыва. Наиболее критичными для определения предельных деформаций являются круги в зоне разрушения. Поверхностная деформация измерялась по длинам главных и малых осей эллипсов. Для снятия показаний использовался оптический микроскоп.

Уравнения применяются для расчета как большой, так и малой деформации образца.

$$\text{Большие деформации} = \frac{\text{Длина большой оси} - \text{начальный диаметр окружности}}{\text{начальный диаметр окружности}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\text{Малые деформации} = \frac{\text{Длина малой оси} - \text{начальный диаметр окружности}}{\text{начальный диаметр окружности}} \cdot 100\% \quad (2)$$

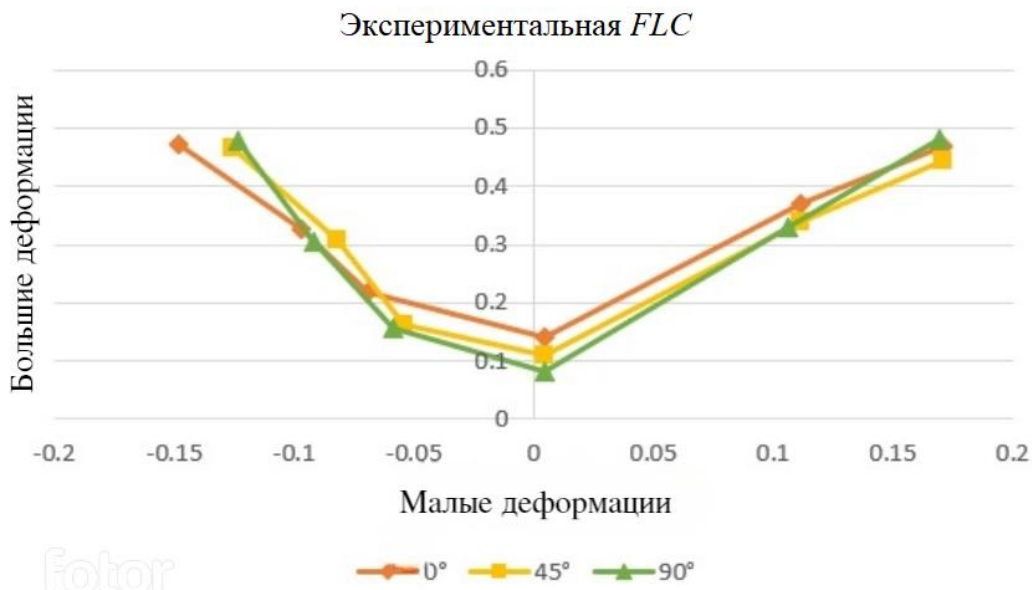


Рис. 12. Предельная кривая формообразования экспериментальным методом для SS316L

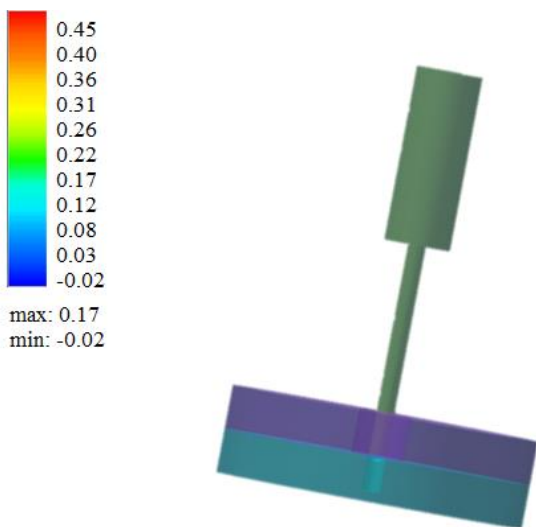


Рис. 13. Основная деформация для траектории двухосной деформации

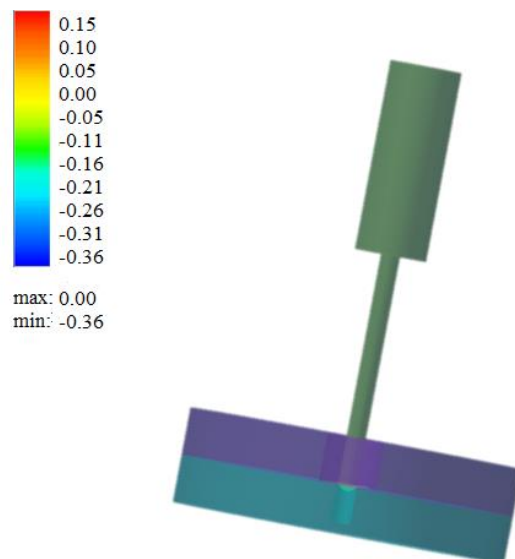


Рис. 14. Малая деформация для траектории двухосной деформации

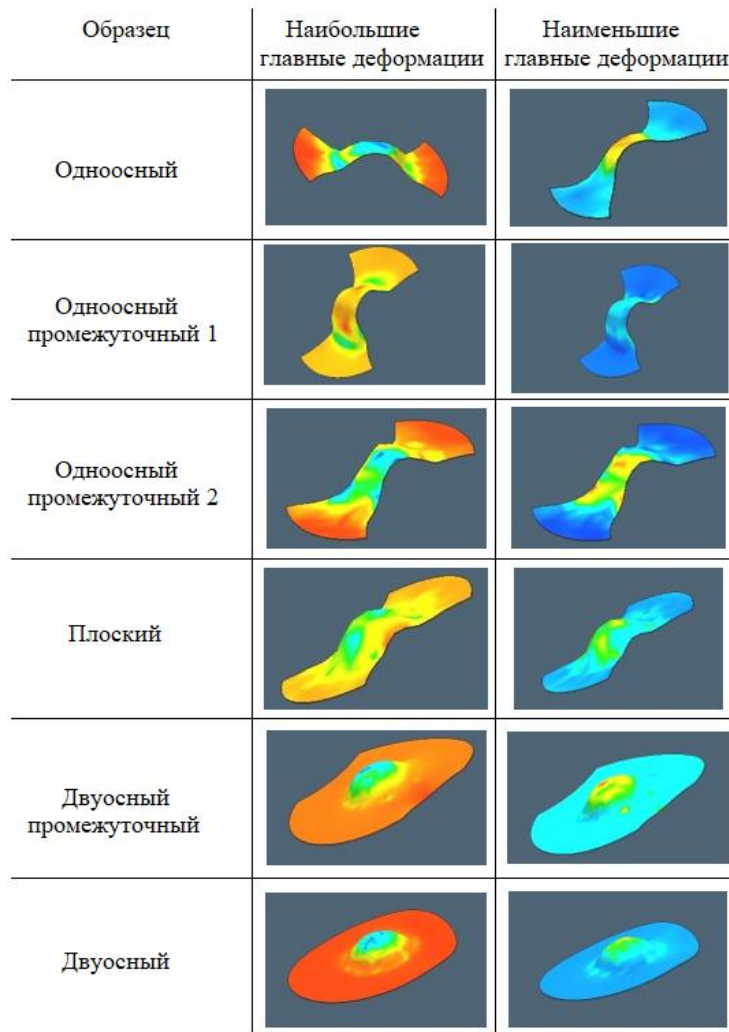


Рис. 15. Наибольшие и наименьшие главные деформации образца

Таблица 1

**Численное моделирование измерений шести случаев деформации**

Угол поворота	Образец	Наименьшая главная деформация	Наибольшая главная деформация
0°	Одноосный	-0,1338	0,4407
	Одноосный промежуточный I	-0,0931	0,3068
	Одноосный промежуточный II	-0,0663	0,2006
	Плоский	0,00441	0,1231
	Двухосный промежуточный	0,1042	0,3345
	Двухосная	0,1574	0,4490
45°	Одноосный	-0,11513	0,4379
	Одноосный промежуточный I	-0,0750	0,2884
	Одноосный промежуточный II	-0,0580	0,1811
	Плоский	0,00454	0,0979
	Двухосный промежуточный	0,1011	0,3178
	Двухосная	0,1521	0,4296
90°	Одноосный	-0,1121	0,4362
	Одноосный промежуточный I	-0,0911	0,281
	Одноосный промежуточный II	-0,0622	0,1455
	Плоский	0,00427	0,0767
	Двухосный промежуточный	0,0995	0,3142
	Двухосный	0,1574	0,4511

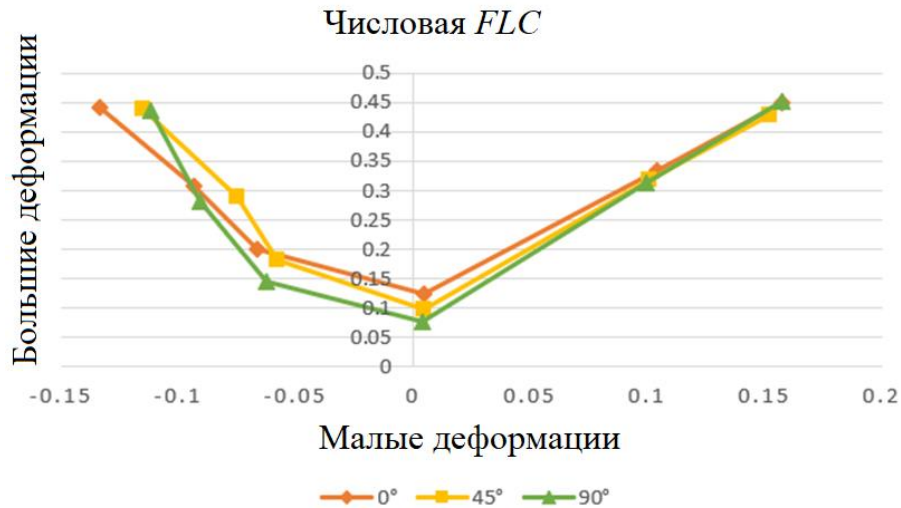


Рис. 16. Предельная кривая формообразования при численном моделировании SS316L

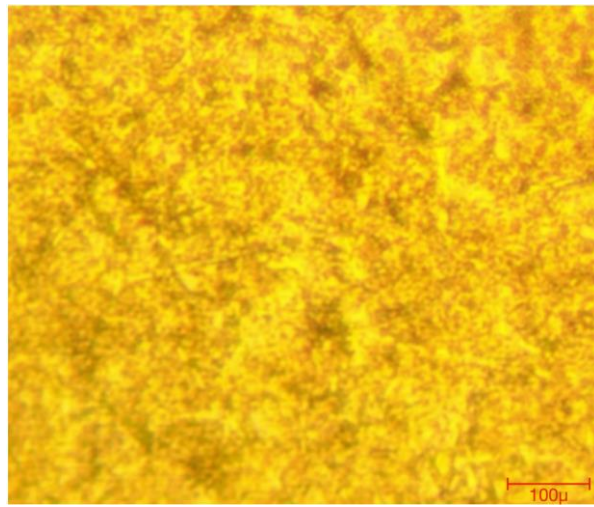


Рис. 17. Микроструктурное изображение SS316L

На рис. 12 показаны кривые предельного разрушения, построенные по экспериментальной методике для всех траекторий деформации при различных направлениях прокатки (0, 45, 90°). Показано, что кривые предельных разрушений для более высоких главных деформаций формируются при ориентации около 0° к направлению прокатки.

### Численные результаты

Результаты численного моделирования выполняются в виде больших и малых деформаций для всех траекторий деформации в соответствии с требованиями. На рис. 13 и рис. 14 показаны результаты конечно-элементного моделирования в виде больших и малых деформаций для двухосного пути деформации при направлении прокатки 0°.

На рис. 15 показаны большие и малые деформации с учетом всех путей деформации для каждого из направлений прокатки (0, 45, 90) для образца из фольги толщиной 60 мкм.

Результаты представлены в табл. 4. Эти данные были использованы для построения предельных кривых. На рис. 16 показаны предельные кривые, построенные при численном моделировании всех

### Результаты экспериментов

Основной целью экспериментов является получение и построение предельных кривых. Предельные кривые формообразования были построены на основе испытаний для заданной толщины и различных направлений прокатки. Область, лежащая под кривой предельной деформации, считается безопасной зоной для технологии формования определенной толщины, а область над кривой предельной деформации - зоной разрушения.

В качестве среднего значения основных и малых деформаций принимается среднее значение по трем испытаниям. В табл. 3 приведены значения всех шести траекторий деформации листа SS316L толщиной 60 мкм при трех различных направлениях прокатки (0, 45, 90)

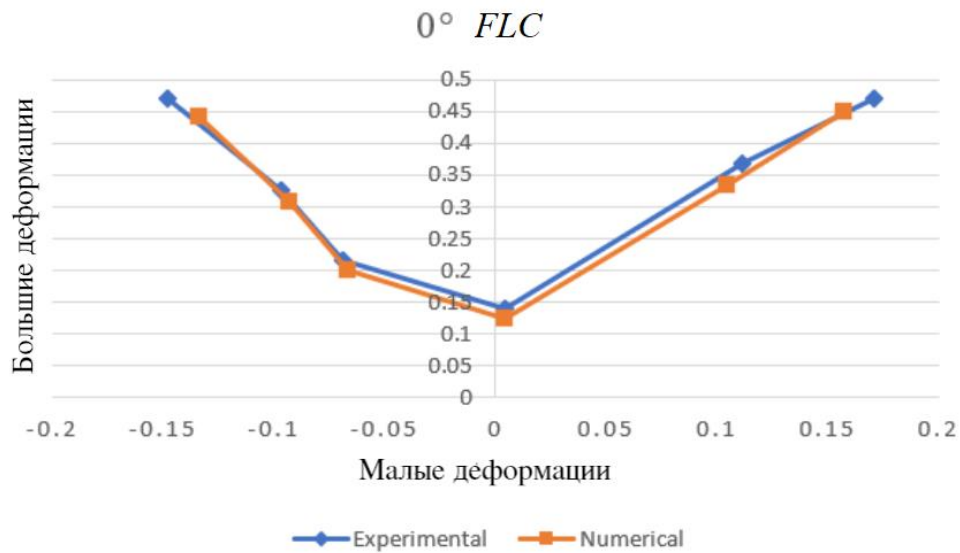


Рис. 18. Сравнение кривой предельной деформации: экспериментальное и численное

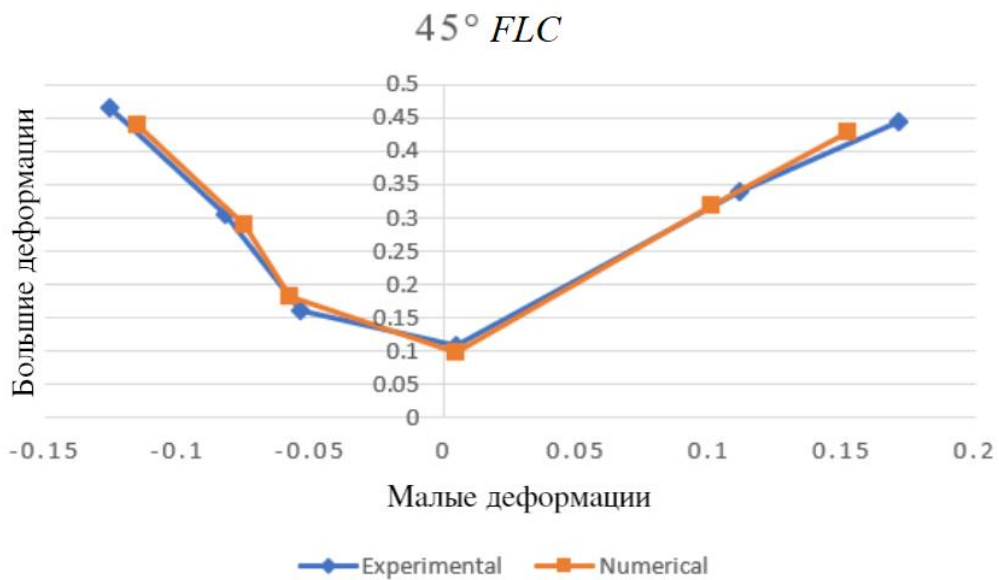


Рис. 19. Сравнение кривой предельной деформации: экспериментальное и численное

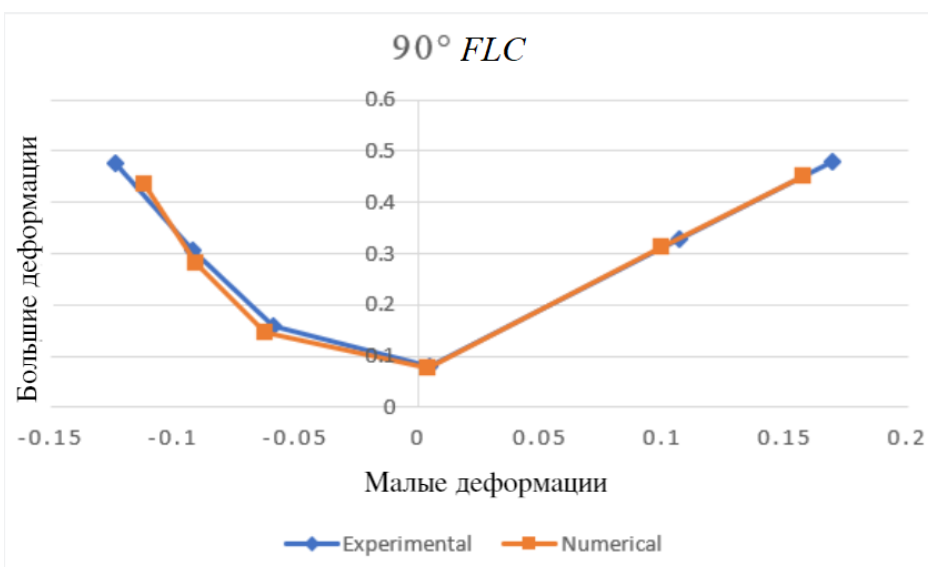


Рис. 20. Сравнение кривой предельной деформации: экспериментальное и численное

Таблица 5

## Измерение размера зерна SS316L

Параметр	Значение
Размер зерна ASTM	10,24
Площадь одного поля	0,82 мм <sup>2</sup>
Количество полей	1

траекторий деформации при различных направлениях прокатки (0°, 45°, 90°).

## Микроструктурное исследование

Для анализа микроструктуры использовался оптический микроскоп. Перед применением оптической микроскопии необходимо подготовить образцы. Для вырезки образцов использовался процесс проволоночной электроэрозионной обработки в заданных направлениях прокатки. После этого поверхности образцов полировались с использованием салфетки *Selvyt* для притирки и коллоидного силикагеля после их шлифовки мелкозернистой бумагой зернистостью 800. Наконец, для исследования с помощью оптического микроскопа проводилось предварительное электролитическое травление путем погружения в 10%-ный раствор щавелевой кислоты в H<sub>2</sub>O на 30 секунд при напряжении 15 Вольт. Микроструктурное изображение образца SS316L представлено на рис. 17.

Измерение размеров зерен и фазовый анализ проведены с использованием программного обеспечения для анализа изображений, как показано в табл. 5 и 6. Размер зерен SS316L был определен в соответствии со стандартом ASTM - E 112-13/E 1382-97 и составил 10,24 мкм.

Фазовый анализ проводился в соответствии со стандартом ASTM - E562-11 и было установлено, что в микроструктуре присутствуют фазы аустенита ( $\gamma$ ) и дельта-феррита ( $\delta$ ), причем на долю аустенита приходится 79,65%, а на долю дельта-феррита – 20,35%.

## Сравнение методов

На рис. 18–20 для листа толщиной 60 мкм показано сравнение двух методик. Видно, что численный метод дает результаты, практически совпадающие с экспериментальными данными.

В экспериментальной работе плоская деформация для листа толщиной 60 мкм с направлением прокатки 0° была определена как 0,1409, в то время как при использовании численного метода она составила 0,1231. Это свидетельствует о том, что значения на кривых предела формования, полученные экспериментальным методом, больше, чем на кривой, полученной методом численного моделирования. Численное значение кривой предельной деформации оказалось ниже для SS316L, что обеспечивает более безопасную конструкцию.

Таблица 6

## Фазовый анализ SS316L

Параметр	Значение
Аустенит( $\gamma$ )	79,65%
Дельта-Феррит ( $\delta$ )	20,35%

В ходе экспериментальной работы плоская деформация для листа толщиной 60 мкм при направлении прокатки 45° была определена как 0,1099, в то время как при численном моделировании она составила 0,0979. Значения на кривых предела формования, полученные экспериментальным методом, больше, чем на кривой, полученной численным методом. Численное значение на кривых оказывается ниже для SS316L, что обеспечивает безопасность конструкции.

В экспериментальной работе плоская деформация для 60 мкм при направлении прокатки 90° была определена как 0,0809, в то время как при использовании численного метода она составила 0,0767. Экспериментальные значения больше, чем полученные численным методом. Численное значение кривой предельной деформации оказывается ниже для SS316L, что обеспечивает безопасность конструкции.

Сравнение экспериментального метода с численным моделированием показало хорошее соответствие. Было выявлено, что кривые предела формования, полученные с помощью численного моделирования являются безопасными, и на 5%-12% меньше, чем в экспериментальном методе. Для изучения физики формирования листа и его характеристик также проведены микроструктурные исследования испытуемого объекта до и после формования.

## Заключение

В статье рассмотрены методика микроформовки, кривые предела формования и материал SS316L, который используется в нескольких областях биомедицины. Кривые предела формования построены с помощью экспериментальных и численных методов построены предельные кривые формообразования. В экспериментальных исследованиях применялся полусферический пуансон. Эксперимент проводился в трех различных направлениях прокатки. Для определения механических характеристик материала, который будет использоваться при моделировании, предварительно проводится его испытание на растяжение. В экспериментальных исследованиях применялся полусферический пуансон, эксперимент проводился в трех различных направлениях прокатки. Для численного моделирования используется программа *Simufact Forming*. Проведено сравнение кривых предела формования (*FLC*) по результатам моделирования и экспериментальной работы. Для изучения

свойств материала при формировании проводился микро-структурный анализ с помощью оптического микроскопа, определены размер зерна и фазовый состав.

Было доказано, что экспериментальные исследования по изучению поведения пластичных повреждений и деформаций имеет высокую степень безопасности. На основании экспериментальных исследований, а также численного моделирования тонкого фольгированного листа SS316L можно сделать следующие выводы:

1. При использовании шести различных траекторий деформации эффективно построены *FLC* для изучения поведения при микродеформации SS316L.

2. Построена эффективная модель численного моделирования деформаций и вязкого разрушения.

3. Сопоставимое поведение кривых предельной деформации, полученных численным и экспериментальным путем, показывает, что созданная численная модель позволяет получить полное представление о физических аспектах процесса.

4. Проведено исследование анализа микроструктуры при микроформовке.

## Список литературы

1. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials // *Micromachines*. – 2021, – Vol. 12. DOI: 10.3390/mi12050571
2. Carasusin E., Canal F. An automated procedure for non-contact strain analysis of sheet metal parts // *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings*. – 2003
3. Gowthaman P.S., Gowthaman J.S., Athisankar P. A study on wire electric discharge machining process parameters friction stir welding view project wire electrical discharge machining view project // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9, No. 11. – P. 908–921.
4. Hariharan K., Balaji C. Material optimization: A case study using sheet metal-forming analysis // *J. Mater. Process. Technol.* – 2009. – Vol. 209, No. 1. – P. 324–331. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.01.063.
5. Kane M.M., Phanse A.A., Bahirat H.J., Kulkarni S.V. Classification and comparative study of EDM pulse generators // *Power Electronics*. – 2020. – Vol. 13, No. 14. – P. 3146–3154. DOI: 10.1049/iet-pel.2020.0205.
6. Kulkarni O., Kakandikar G. Formability assessment with microstructural investigations for zirconium 702 thin foils: bio-material applications // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – Vol. 8. – No. 4. – P. 2367–2377. – 2022. DOI: 10.1080/2374068X.2022.2044131
7. Kulkarni O., Kakandikar G. Novel product design of tool for investigating formability with microstructural study of bio-material titanium grade-II thin foils // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. – 2022. DOI: 10.1007/s12008-022-00903-3
8. Kumar S.D., Amjith T.R., Anjaneyulu C.. Forming limit diagram generation of aluminum alloy aa2014 using nakazima test simulation tool // *Procedia Technology*. – 2016 – Vol. 24. – P. 386–393. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.05.053
9. Mashalkar A., Kakandikar G., Nandedkar V. Micro-forming analysis of ultra-thin brass foil // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 34, No. 13. – P. 1509–1515. DOI: 10.1080/10426914.2019.1655158
10. Musa M.A., Razali A.R., N. Kasim I. Grain and feature size effect on material behavior for micro-sheet-forming. in *Applied Mechanics and Materials* // *Trans. Tech. Publications Ltd.* – 2014. – P. 77–80. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.680.77
11. Natarajan K. Study on optimization of WEDM process parameters on stainless steel // *J. Nanomater.* – 2022. – Vol. 2022., DOI: 10.1155/2022/6765721
12. Patel G., Ganesh K.M, Kulkarni O. Experimental and numerical investigations on forming limit curves in micro forming // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2020. – P. 1–12. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1793268
13. Patel G., Kakandikar G. Investigations on effect of thickness and rolling direction of thin metal foil on forming limit curves in microforming process. in *Modern Manufacturing // Processes*, Elsevier. – 2020. – P. 145–155. DOI: 10.1016/B978-0-12-819496-6.00007-5
14. Pradeep R.C., Ramesh T. Influence of size effects and its key issues during microforming and its associated processes – A review // *Engineering Science and Technology an International Journal*. – 2021. – Vol. 24, No. 2. – P. 556–570. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.08.007
15. Raheem Z. Designation: E8/E8M – 13a Standard Test Methods for Tension // *Testing of Metallic Materials 1*. – 2019, DOI: 10.1520/E0008\_E0008M-13A
16. Sahu J., Chakrabarty S., Raghavan R., Mishra S. Investigations of size effect on formability and microstructure evolution in SS304 thin foils // *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2018. – Vol. 53, No. 7. – P. 517–528. DOI: 10.1177/0309324718792443
17. Shao Z. Experimental investigation of forming limit curves and deformation features in warm forming of an aluminium alloy // *Proc. Inst. Mech. Eng. B. J. Eng. Manuf.* – 2018. – Vol. 232. – No. 3. – P. 465–474., DOI: 10.1177/0954405416645776
18. Singh D., Singh R., Boparai K.S., Farina I., Feo L., Verma A.K. In-vitro studies of SS 316 L biomedical implants prepared by FDM, vapor smoothing and investment casting // *Compos. B. Eng.* – 2018. – Vol. 132. – P. 107–114. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.08.019.
19. Standard Test Methods for Determining Forming Limit Curves [Online], available at: [www.randb.co.kr](http://www.randb.co.kr) (accessed 06.10.2023)
20. Sudarsan C., Banker K.H., Hazra S., Bhagat R., Panda K. S. Experimental investigations on forming limit diagram of ultra-thin SS 304 steel: effect of circular grid size, sheet orientation, punch size and deformation speed // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2019. – Vol. 5, – No. 1. – P. 25–38., DOI: 10.1080/2374068X.2018.1510679
21. Wankhede P. Suresh K. A review on the evaluation of formability in sheet metal forming // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2020. – Vol. 6, No. 2. – P. 402–429. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1731229

**Финансирование.** Работа не имела источников финансирования.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы хотели бы поблагодарить за поддержку, оказанную профессорами машиностроения инженерно-технологического факультета технологического института Махараштры.

## MICRO FORMING STUDIES OF SS316L AS BIOMEDICAL APPLICATION MATERIAL

M.N. Bogar, O. Kulkarni, G. Kakandikar

Dr. Vishwanath Karad MIT World Peace University, Pune, India

---

### ARTICLE INFO

Received: 07 July 2023  
Approved: 10 December 2023  
Accepted for publication: 11 December 2023

---

#### Key words:

micro-forming, nakajima test, SS316L, FLC, microstructure

---

### ABSTRACT

The process of shaping flat sheets of metal into necessary shapes without any flaws is known as sheet metal making. Nowadays, there is a growing demand for micro goods and microdevices due to the popularity of miniaturization across many industries. The manufacturing method known as micro forming creates tiny components for various engineering uses. Micro-forming can be found in a variety of fields, including automotive, biomedical, and aerospace engineering. Whenever the sheet material's thickness corresponds to ingrained length distribution of the material being used during the micro-forming process, the deformation behavior is different from what is anticipated for the macroscopic sheet material. A material's ability to be formed is one of the crucial processes, and one of the crucial parameters for determining a material's formability is its forming limit curve or as forming limit diagram. The purpose of this study is plotting Forming Limit Curve for specific biomaterial using numerical simulation and experimentation. For the purpose of determining the forming limit curves, a controlled experiment of thin SS316L sheet of 60  $\mu\text{m}$  thickness with different angles in relation to rolling directions ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) is conducted in the present research. In accordance to ASTM-2218-14 standard test, Nakajima test for micro-forming is done using a specimen of uniaxial, uniaxial intermediate, plane, biaxial intermediate and biaxial strain paths to measure limiting strains. The limit diagram for SS316L is formed using the numerical software Simufact Forming V15, and the findings are then compared with the Nakajima test. The comparisons between the experimental method with the numerical simulations show good accordance. It was shown that FLC produced by numerical simulation are designed to be 5% to 12% less than experimental work and are safe. To examine the physics of the sheet, micro structural studies are also carried out on the test object both prior to and after forming. The microstructural study explains the characteristics of the sheet.

© PNRPU