Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. А. Глазунова, Я. М. Клебанов, С. П. Александров, Разработка методики компьютерного проектирования подошв обуви, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007, выпуск 2(), 133–137

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu542>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.198.67.100

26 апреля 2023 г., 10:58:33

УДК 685.34.012

Н. А. Глазунова, Я. М. Клебанов, С. П. Александров

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДОШВ ОБУВИ

Рассматриваемая методика проектирования обувных подошв основана на использовании метода конечных элементов. Подробно изучается влияние формы рифлений на концентрацию напряжений в условиях эксплуатационных нагрузок. Изучено влияние толщины подошвы, высоты и радиуса закруглений в рифлении на напряжённо-деформированное состояние в местах концентрации напряжений.

Введение. Современные методы анализа напряжённо-деформированного состояния конструкций и основанные на их использовании технологии компьютерного проектирования до настоящего времени мало использовались при разработке конструкции деталей низа обуви. Наиболее изучены вопросы взаимодействия стопы с обувью, оптимизация конструкции каблучной части обуви [1–4]. Вместе с тем, проблемы деформирования и износа низа обуви имеют важное значение для обеспечения качества изделия на стадии проектирования. Одним из наиболее часто встречающихся дефектов, наряду с истиранием, при эксплуатации обуви является излом подошвы. Трещина обычно образуется в пучках, то есть на участке, в котором подошва испытывает максимальные напряжения и деформации. От конструкции низа обуви зависят условия работы подошвы на поверхности изнашивания и в местах, подвергающихся многократному изгибу, сжатию и сдвигу. Наличие на ходовой стороне рифления и соответствующей концентрации напряжений может способствовать излому подошвы. Изменяя конструкцию, можно снижать уровень и оптимизировать характер распределения контактных нагрузок на стопу, степень проскальзывания подошвы по опоре, создавать необходимый запас прочности.

Податливость подошвы выбирается в соответствии с эргономическими требованиями. Это определяет соотношение толщины подошвы и жёсткости её материала. Из опыта известно, что подошвы толщиной 5–8 мм с неглубоким рисунком рифлений на ходовой поверхности более устойчивы к усталости при многократном изгибе, чем подошвы толщиной 9–20 мм. Подошвы толщиной более 20 мм обладают ещё меньшим сопротивлением многоцикловой усталости, так как они более жёсткие. На ходовую поверхность таких подошв не рекомендуется наносить глубокое рифление.

В отечественной практике проектирование ходовой поверхности подошв обуви проводится на основе опытно-экспериментальных данных с использованием накопленного опыта разработчиков. Поэтому возникает задача обоснования новых подходов к проектированию рифления подошв обуви, основанных на использовании методов механики деформирования твёрдого тела и современных методов имитационного моделирования. Должна быть разработана методика компьютерного проектирования подошв, позволяющая, в частности, проанализировать влияние формы и размеров рифлений на долговечность изделия.

В данной работе рассматриваются некоторые результаты исследований, направленных на повышение качества низа обуви путём разработки и внедрения в процесс проектирования современных методов компьютерного моделирования деталей обуви, и учёта их механического поведения при эксплуатации. Целью работы является создание методики компьютерного моделирования и анализа напряжённо-деформированного состояния подошв обуви, основанной на иерархическом моделировании. Исследование напряжённого состояния подошв обуви выполняется в пакете CAE ANSYS® методом конечных элементов.

Свойства материалов. При описании механического поведения обувных материалов необходимо выбрать адекватные определяющие зависимости. В наших исследованиях используются трёх- и пятипараметрические модели гиперупругого поведения материала Муни–Ривлина [5, с. 268], которые учитывают геометрически нелинейное поведение конструкции и позволяет описать все особенности диаграмм деформирования резин, кож и других обувных материалов.

Определяющее уравнение деформирования записывается в следующем виде:

$$S_{ij} = dW/dE_{ij},$$

где S_{ij} — компоненты второго тензора напряжений Пиолы–Кирхгофа, W — удельная энергия деформирования, E_{ij} — компоненты тензора деформации Лагранжа.

Для трёхпараметрической модели Муни–Ривлина, применяющейся в моделировании пове-

дения и свойств подошвенной резины, удельная энергия деформирования записывается так:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3) (I_2 - 3) + d^{-1} (J - 1)^2,$$

где I_1 — первый инвариант девиатора деформации; I_2 — второй инвариант девиатора деформации; C_{10} , C_{01} , C_{11} — материальные константы; d — коэффициент несжимаемости материала, J — детерминант матрицы градиента деформации.

Эти материальные константы связаны с начальным модулем сдвига $\mu = 2(C_{10} + C_{01})$ и начальным модулем объёмного деформирования $K = \frac{2}{d}$, где $d = \frac{1-2\nu}{C_{10}+C_{01}}$, ν — коэффициент Пуассона.

Для пятипараметрической модели Муни—Ривлина, используемой в данной работе при описании поведения кожаных материалов деталей верха обуви, удельная энергия деформирования записывается в виде:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{11} (I_1 - 3) (I_2 - 3) + C_{02} (I_1 - 3) + d^{-1} (J - 1)^2,$$

где вводятся два дополнительных коэффициента C_{20} и C_{02} .

Параметры модели Муни—Ривлина для обувной подошвенной резины и комплекта материалов верха, состоящего из кожи, проклеенной тканью, определялись на основе экспериментальных диаграмм растяжения [6; 7, с. 250]. Полученные значения параметров сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров определяющих уравнений

Вариант модели	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	d
Подошвенная резина	0,49671	3,0063	—	−0,024725	—	0
Комплект материалов верха	−47,891	62,039	29578	−64745	35606	0

При проектировании модели обуви в пакете CAE ANSYS® можно учесть свойства основных, подкладочных и промежуточных деталей верха и низа: союзки, берцев, задника, подноски, основной стельки, полустельки, геленка, простилки, вкладной стельки, подошвы и других. Рассматриваемая в данной работе конструкция низа обуви включает основную стельку, полустельку, простилку и подошву, формованную с каблуком. Материал основной стельки и полустельки — стелечный картон — рассматривается как изотропно упругий с модулем упругости 500 МПа и коэффициентом Пуассона 0,3. Из картона изготавливаются также другие промежуточные детали верха: подносок и задник.

Иерархическое моделирование. Для изучения влияния формы и размера рифлений на прочность подошвы сначала была рассмотрена модельная задача деформирования подошвы с одним поперечным рифлением. Изучение взаимного влияния рифлений — это самостоятельная задача и в настоящей работе не рассматривается.

С целью повышения эффективности расчётов использовался иерархический метод подконструкций. В соответствии с ним сначала выполняется моделирование процесса деформирования глобальной модели всего ботинка, включающей детали верха и низа обуви. Далее с учётом воздействия деталей верха обуви рассчитывается подконструкция первого уровня — комплект деталей низа, а затем в интересующих нас местах концентрации напряжений, вызванной рифлением, «навешивается» подконструкция второго уровня — локальная модель с измельчённой сеткой. Таким образом, реализуется схема трёхуровневой декомпозиции.

Такой подход позволяет на первом этапе при расчёте глобальной модели получить достаточно точную форму деформированной конструкции с учётом влияния жёсткостных характеристик всех деталей обуви. В этом случае используется относительно грубая конечно-элементная сетка. Подошва обуви аппроксимируется сеткой объёмных конечных элементов Solid185, а плоские детали верха и низа обуви задаются оболочечными элементами Shell181. На втором этапе рассчитывается комплект деталей низа обуви, который является подмоделью по отношению к глобальной модели. Таким образом, поведение низа обуви моделируется с учётом влияния жёсткости деталей верха. При этом для подошвы, основной стельки, полустельки и простилки используются те же типы конечных элементов, но с более мелкой сеткой. В качестве нагрузки на подошву в процессе подмоделирования задаются перемещения, уже полученные в глобальной модели в месте соединения деталей верха и низа обуви. Третьим этапом иерархического моделирования является расчёт участка рифления в наиболее нагруженной его части. И фрагмент подошвы и основная стелька задаются уже объёмными элементами с ещё более детальным описанием геометрии.

Метод подмоделей при решении рассматриваемой задачи позволяет получить не только более точные результаты в изучаемой области рифления. Он облегчает рассмотрение разных вариантов конструкции и её оптимизацию.

Общий вид конечно-элементной аппроксимации модели обуви представлен на рис. 1. На рис. 2 показано конечно-элементное разбиение низа обуви. Рис. 3 и 4 иллюстрируют конечно-элементную сетку подмоделей второго уровня для рифлений различной формы.

Рис. 1. Общий вид конечно-элементной аппроксимации модели обуви

Рис. 2. Конечно-элементное разбиение низа обуви

Рис. 3. Конечно-элементная сетка в районе рифления круглого сечения

Рис. 4. Конечно-элементная сетка в районе рифления прямоугольного сечения

Известно, что при подъёме стопы на носок при ходьбе изгибу подвергается только пучковая часть системы низа обуви [8]. В представленной модели опирание обуви учитывалось закреплением нижней поверхности носочной части подошвы в вертикальном направлении. Высота подъёма крайней точки каблука задаётся перемещениями по осям в соответствии со средними эксплуатационными значениями [9]. Схема нагружения и закрепления ботинка представлена на рис. 5. Напряжёнno-деформированное состояние глобальной модели, подошвы и фрагмента рифления показано на рис. 6.

Рис. 5. Схема нагружения обуви: u_x — перемещения по оси x ; u_y — перемещения по оси y ; Δ — закрепление носочной части подошвы

Имитационное моделирование. При разбиении модели на конечные элементы важным этапом является определение размеров конечных элементов в зоне рифления, достаточного для адекватного описания напряжёнno-деформированного состояния. Было просчитано несколько вариантов конечно-элементной аппроксимации подмодели. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при размере элементов 0,08–0,09 от ширины рифления результат становится достаточно точным и при дальнейшем измельчении сетки практически не изменяется.

При изучении влияния размеров подошвы и рифления на напряжёнno-деформированное состояние в зоне концентрации напряжений были смоделированы рифления, имеющие следу-

Рис. 6. Поля интенсивности напряжений: а – глобальная модель, б – подмодель первого уровня – низ обуви, в – подмодель второго уровня – фрагмент рифления

ющие изменяемые параметры: h – толщина подошвы, r – радиус закругления рифления в наивысшей его точке, δ – глубина рифления, a – ширина рифления. Схемы рифлений показаны на рис. 7. Сопряжение закругления рифления в верхней точке с боковыми сторонами по второй схеме выполнялось плавной кривой.

Рис. 7. Схемы и размеры рифлений

Сначала были проанализированы подошвы разной толщины h с рифлением по первой схеме радиусом $r = 5$ мм при $\delta = r$. Нейтральная ось в месте рифления располагается на глубине примерно 3 мм от внутренней поверхности подошвы. Основной вид напряжённого

состояния стельки – продольное сжатие, на которое накладываются изгибные напряжения. Максимальная высота подъёма пяточной части подошвы во всех случаях была равна 85 мм. Полученные результаты сведены в табл. 2. Из неё видно, что с увеличением толщины подошвы при постоянной форме рифлений напряжения в рифлении увеличиваются.

Таблица 2

Наибольшие значения интенсивности напряжений в рифлении подошв разной толщины

Толщина подошвы, мм	8	10	13	15
Наибольшее значение интенсивности напряжения, МПа	1,378	1,669	1,868	1,946

Далее рассматривалось влияние глубины рифления. Радиус закругления и толщина подошвы оставались постоянными: $h = 13$, $r = 5$ мм. Анализируя приведённые в табл. 3 напряжения получаем следующую закономерность: при увеличении глубины рифления напряжения в подошве возрастают.

Таблица 3

Наибольшие значения интенсивности напряжений в рифлении разной глубины

Глубина рифления δ , мм	5	6,5	7,5
Наибольшее значение интенсивности напряжения, МПа	1,868	2,175	2,327

Следующим этапом анализа было выявление зависимости напряжений в рифлении от величины радиуса закругления в наивысшей его точке. В этом случае рассматривались подошвы со второй схемой с одинаковой толщиной $h = 13$ мм и с одинаковой шириной рифления $a = 10$ мм. В табл. 4 представлены наибольшие значения интенсивности напряжений в рифлениях глубиной $\delta = 6,5$ мм и $\delta = 7,5$ мм.

Рассматривая влияние радиуса закругления на напряжение в подошве одинаковой толщины и одинаковой глубины рифлений, видим, что при уменьшении радиуса закругления сечения

Таблица 4

Наибольшие значения интенсивности напряжений в рифлениях разного радиуса закругления

Глубина рифлений δ , мм	6,5			7,5		
Радиус закругления рифлений r , мм	5	3	1,5	5	2,7	1,1
Наибольшее значение интенсивности напряжения, МПа	2,175	2,452	2,726	2,327	2,752	3,086

напряжения при изгибе подошвы возрастают.

Были проведены также сравнительные расчёты подошв с рифлениями круглой и прямоугольной формы (первая и третья схемы). Рифления круглой формы имели радиус $r = 5$ мм. Рифления прямоугольной формы были глубиной $\delta = 5$ мм, при этом скругление углов рифления выбрано радиусом $r = 1$ мм. Напряжения в рифлении с прямоугольным сечением напряжения на 7 % выше, чем в рифлении с круглым сечением, что связано с уменьшением радиуса скруглений.

Выводы. В представленной работе детально проанализировано механическое поведение деталей обуви, изучено влияние формы и размера рифлений подошв на их стойкость к изгибающим и растягивающим нагрузкам.

В результате анализа полученных данных установлено, что при прочих равных условиях с увеличением толщины подошвы или при увеличении глубины рифления напряжения в подошве в месте рифления возрастают. Применение рифлений прямоугольной формы по третьей схеме также приводит к увеличению напряжений.

Как показывают результаты усталостных испытаний, даже небольшое увеличение циклических напряжений может существенно уменьшить долговечность резиновых материалов. Определение наиболее рациональных видов рифлений с точки зрения устойчивости к циклическим нагрузкам позволит проектировать в дальнейшем подошвы с заданной долговечностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клебанов, Я. М. Исследование механических свойств деталей обуви [Текст] / Я. М. Клебанов, С. П. Александров, А. Н. Давыдов, А. Н. Лукьянова // Изв. вузов. Технология лёгкой пром-сти. — 2000. — № 6. — С. 97–99.
2. Александров, С. П. Анализ напряжённо-деформированного состояния системы низа обуви [Текст] / С. П. Александров, А. Н. Лукьянова / Современные проблемы текстильной и лёгкой пром-сти: Тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. — М.: РосЗИТЛП, 2004. — Ч. 1. — С. 127.
3. Александров, С. П. Метод расчёта оптимальной конструкции каблучной части обуви [Текст] / С. П. Александров, О. Я. Москвин / Современные проблемы текстильной и лёгкой пром-сти: Тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. — М.: РосЗИТЛП, 2000. — Ч. 1. — С. 119.
4. Александров, С. П. Компьютеризированные системы для исследования взаимодействия стопы с обувью [Текст] / С. П. Александров, Е. А. Кузнецова // Кожевенно-обувная пром-сть. — 2006. — № 1. — С. 43–45.
5. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров [Текст]: Справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.
6. Анохин, Д. И. Исследования формовочных свойств заготовок верха обуви [Текст] / Д. И. Анохин, Ю. П. Зыбин // Изв. вузов. Технология лёгкой пром-сти. — 1960. — № 3. — С. 120–121.
7. Зурабян, К. М. Материаловедение изделий из кожи [Текст] / К. М. Зурабян, Б. Я. Краснов, М. М. Бернштейн. — М.: Легпромышлениздат, 1988. — 416 с.
8. Александров, С. П. Исследование напряжений в клеевом слое системы низа обуви при изгибе [Текст] / С. П. Александров // Изв. вузов. Технология лёгкой пром-сти. — 1991. — № 2. — С. 51–56.
9. Горбачик, В. Изгибная жёсткость обуви [Текст] / В. Горбачик // Кожа и обувь. — 2003. — № 1(1). — С. 14–15. — (Имеется электронный ресурс: <http://textile-press.ru/?id=1585>).