

Silesian University of Technology
Faculty of Transport



Transport

Problems 2015

Proceedings

VII International Scientific Conference

IV International Symposium of Young Researchers

**UNDER THE HONORARY
PATRONAGE OF THE SILESIA GOVERNOR
AND MAYOR OF KATOWICE CITY**

ISBN 978-83-935232-6-9

Transport Problems
International Scientific Journal



**Silesian University of Technology
Publication
Faculty of Transport**

Edition and reviews

Prof. Aleksander Śladkowski

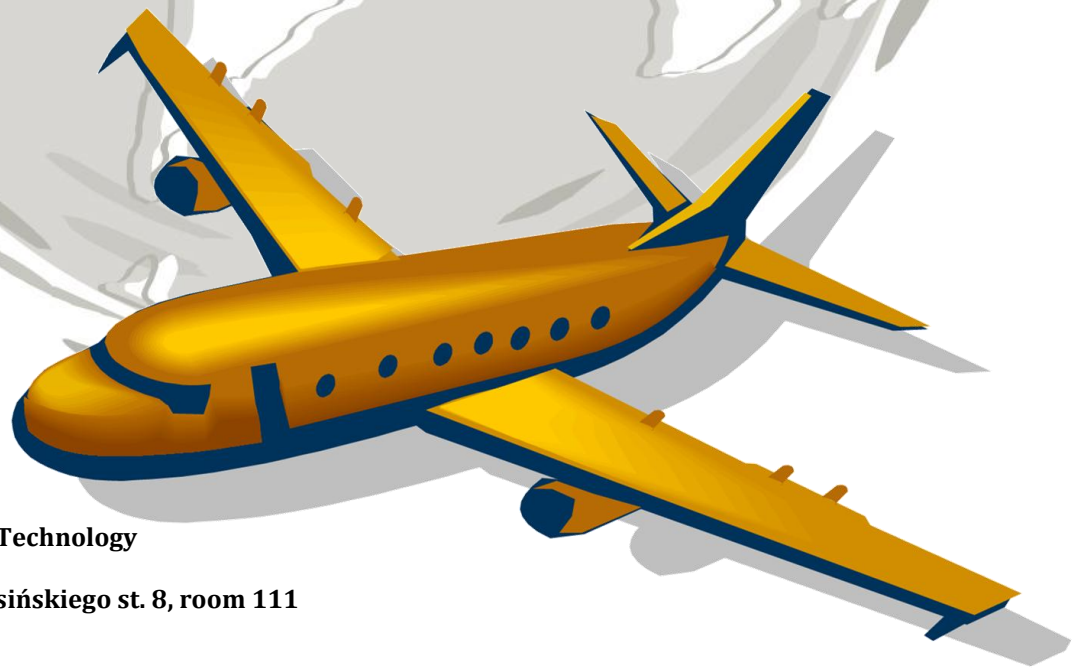
Technical edition

Ds.C., Ph.D. Piotr Czech

Ph.D. Tomasz Haniszewski

Ph.D. Łukasz Konieczny

Ph.D. Damian Gąska



Silesian University of Technology
Faculty of Transport
40-019 Katowice, Krasińskiego st. 8, room 111
tel. +48 32 603 41 46
mail: tp@polsl.pl

61.	Merab SHVANGIRADZE EFFECTIVENESS OF THE USE BASALT FIBER IN MANUFACTURE HIGH PRESSURE BOTTLES FROM POLIMERIC COMPOSITE MATERIALS	543	549
62.	Katarzyna SICINSKA, Anna ZIELINSKA IN-DEPTH INVESTIGATION ON SCENE OF AN ACCIDENT – PILOT STUDY OF DACOTA (ROAD SAFETY DATA, COLLECTION TRANSFER AND ANALYSIS) PROJECT	550	561
63.	Bogusław ŚLEZIAK ROAD COLLISIONS AS A SOCIAL PROBLEM	562	566
64.	Aleksander SŁADKOWSKI, Krzysztof BIZOŃ TO THE PROBLEM OF THE RAIL FASTENINGS CALCULATION USING FEM	567	574
65.	Andrzej SUROWIECKI, Artur DUCHACZEK, Piotr SASKA PHYSICAL MULTISCALE MODELS OF SUBGRADE AND EARTHEN STRUCTURES IN ROAD AND RAILWAY ENGINEERING	575	584
66.	Edvard TARTAKOVSKY, Volodymyr PUZYR, Yurii DATSUN OPTIMIZATION OF THE KNOWLEDGE BASE BY CHOOSING THE STRATEGY OF THE TECHNICAL SERVICE AND REPAIR OF LOCOMOTIVES	585	590
67.	George TUMANISHVILI, Tamaz NATRIASHVILI, Givi GOLETIANI, Victor ZVIADAURI, Tengiz NADIRADZE IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS OF THE FREIGHT LOCOMOTIVE RUNNING GEAR	591	597
68.	George TUMANISHVILI, Zurab GASITASHVILI, Otar GELASHVILI, Oleg BICHASHVILI, Merab TEDOSHVILI IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS OF INTERACTING SURFACES OF BRAKES	598	605
69.	Aleksandr VOROBEV, Igor IVANOV, Sergey URUSHEV DETERMINATION OF PARAMETERS OF CONTACT OF THE WHEEL WITH THE RAIL FOR VARIOUS SERVICE CONDITIONS OF THE FREIGHT CAR	606	614
70.	Galina ZAMARAEVA ROLE OF RESEARCH AND EDUCATION INTEGRATION IN AN EXPERT TRAINING AND ACME ACHIEVEMENT	615	619
71.	KOLESNIKOV Vladimir, KOLESNIKOV Igor, LYAPIN Alexander, CHEBAKOV Mikhail, KOLOSOVA Elena NONSTATIONARY CONTACT INTERACTION IN METALPOLYMER TRIBOSYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT HEAT GENERATION	890	899

rail fastening system of type SB-IF1, strength calculations, FEM analysis

Aleksander ŚLADKOWSKI*, **Krzysztof BIZOŃ**

Silesian University of Technology, Faculty of Transport

Krasinski st. 8, 40-019 Katowice, Poland

*Corresponding author. E-mail: Aleksander.Sladkowski@polsl.pl

TO THE PROBLEM OF THE RAIL FASTENINGS CALCULATION USING FEM

Summary. The problems of using of the finite element method (FEM) for rail fastenings analysis are considered. As an example was taken separate parts of the fastening of type SB-IF1. On example of spring clip and anchor head were considered different variants of FE meshes generation. It was shown that the solution largely depends on the correctness of FE mesh generation, that at inadequate generation either a solution time will be unacceptably high, or the distribution of contact stresses will not respond to reality.

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МКЭ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

Аннотация. Рассматриваются проблемы использования метода конечных элементов (МКЭ) для анализа рельсовых креплений. В качестве примера взяты отдельные детали крепления типа SB-IF1. На примере пружинной клеммы и головки анкера были рассмотрены различные варианты генерации КЭ сеток. Было показано, что решение задачи в значительной степени зависит от правильности генерации КЭ сеток, что при неадекватной генерации либо время решения будет недопустимо большим, либо распределение контактных напряжений не будет отвечать действительности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рельсовые крепления являются одним из важнейших элементов верхнего строения пути. От их надежности и эксплуатационной стойкости зависит безопасность эксплуатации подвижного состава. Существует множество конструкций как самих креплений, так и их отдельных деталей. Причем конструкции в значительной степени зависят от эксплуатационных условий в той или иной стране. Например, используются ли сварные плети или стыковой путь, какова ширина и подуклонка пути, какие используются рельсы, какова грузонапряженность, есть ли необходимость в изолировании пути. Существует еще множество других факторов, которые следует брать во внимание при проектировании верхнего строения пути и рельсовых креплений в частности.

Поскольку рельсовые крепления работают в весьма непростых эксплуатационных условиях, к которым следует отнести значительные статические и динамические нагрузки, воздействие температуры и факторов, влияющих на коррозию, их износ и возможность появления дефектов различного характера, учесть все отрицательные факторы зачастую не

представляется возможным. Очевидно, что проводятся испытания, как лабораторные, так и полигонные. Тем не менее, при разработке новых конструкций рельсовых скреплений весьма существенную роль играет численные эксперименты, которые позволяют моделировать большинство внешних воздействий, а также нестандартные ситуации, которые могут возникнуть во время длительной эксплуатации рельсовых скреплений.

Одним из наиболее широко используемых в настоящее время методов численного эксперимента является МКЭ. В частности, в работе [1] МКЭ был использован для исследования напряженно-деформированного состояния рельсовых скреплений типа КБ, которые широко применяются на железных дорогах стран бывшего СССР. На рис. 1 показано геометрическое моделирование указанного скрепления.

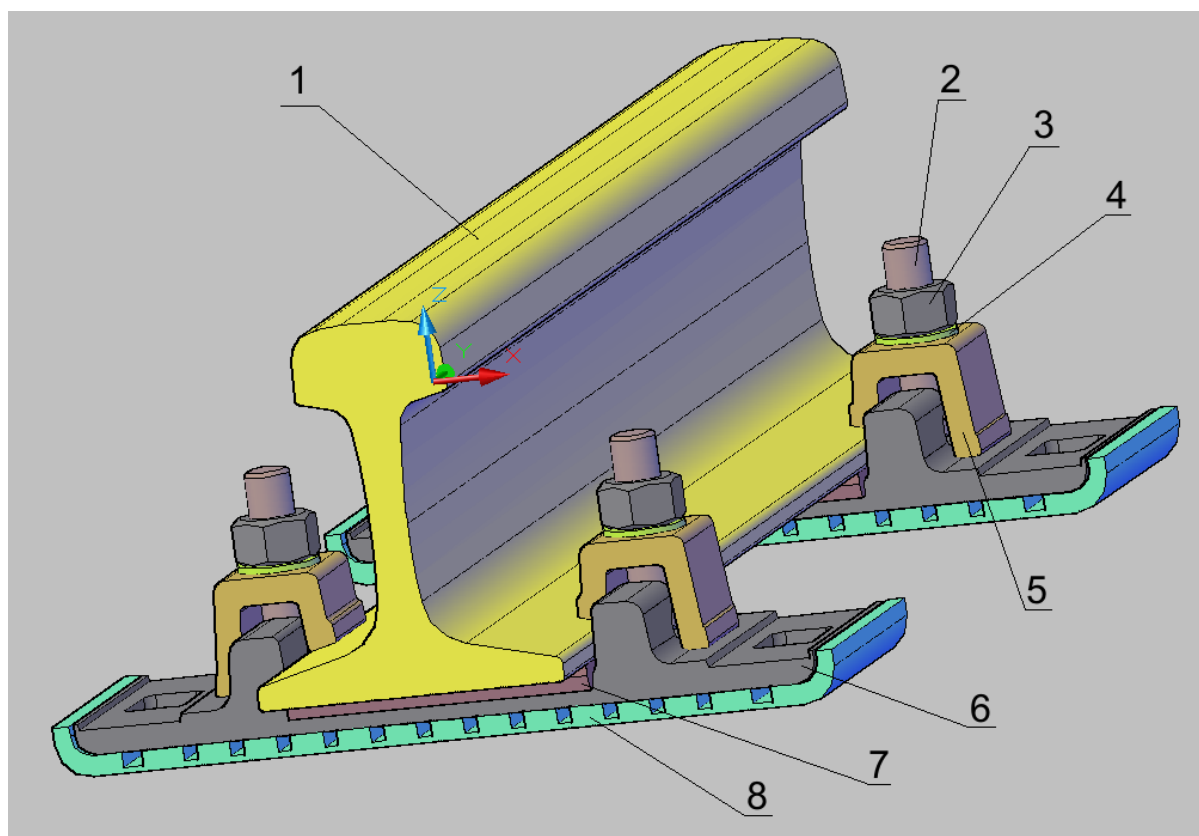


Рис. 1. Геометрическое моделирование рельсового скрепления КБ [1]

Fig. 1. Geometric modelling of rail fastening KB [1]

2. РЕЛЬСОВЫЕ СКРЕПЛЕНИЯ ТИПА SB. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В 80-х годах прошлого века на польских железных дорогах широкое распространение получили рельсовые скрепления типа SB3. Их конструкция показана на рис. 2. Это достаточно простое соединение, где рельс 1 крепится к шпале 6 при помощи пружинной клеммы 3, которая вставлена в головку анкера 4. Функции электроизоляции рельсовой нити выполняют упругая прокладка 5, выполненная из полиамида, а также упругие вставки 2. Эти элементы также частично ответственны за обеспечение упругих свойств пути. Отметим, что аналогичные конструкции рельсовых скреплений используются в настоящее время и для колеи 1524 мм. К ним следует отнести скрепления ЖБР-65, АРС-4 и ряд других.

Конструкция рельсового скрепления SB3 в дальнейшем подвергалась многочисленным модификациям. В частности, закладные элементы (анкеры) существенно изменялись, а том

числе и под болтовые соединения. Заменялись конструкции упругих прокладок. При этом модернизировалась как сама их конструкция, так и материал, из которого они изготавливались. Очевидно, что целью таких изменений было повышение эксплуатационной надежности скреплений и железнодорожного пути в целом, улучшение его динамических характеристик, изоляционных свойств и др. В частности, упругие прокладки выполнялись ранее из полиэтилена, затем из полиуретана. Вначале использовались прокладки, имеющие плоскую поверхность контакта с подошвой рельса. В настоящее время используются профильные прокладки, где указанная поверхность выполняется в форме периодических углублений и выпуклостей. Соответственно, появились различные модификации данного рельсового скрепления, например, SB-4, SB W1, SB W3, SB, SB-IF1 и другие. Таким образом, можно обобщить указанный тип рельсовых скреплений общим индексом SB.

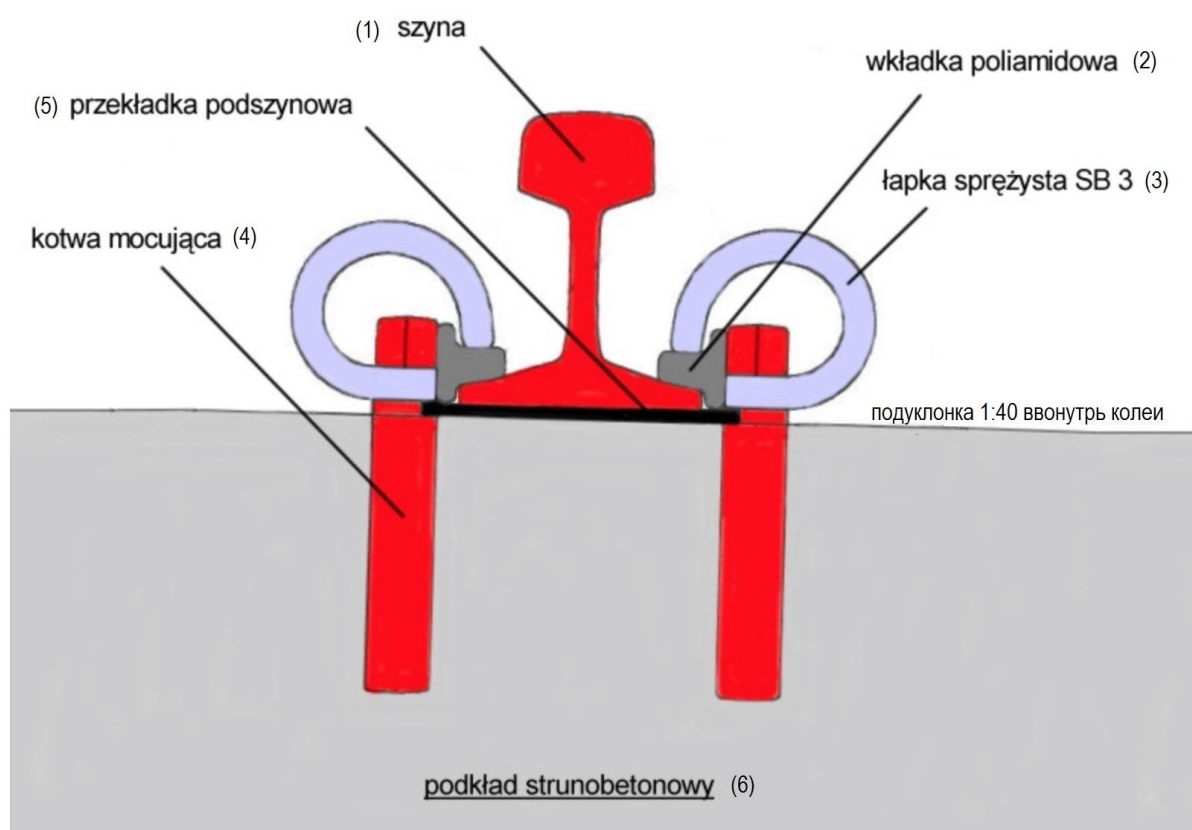


Рис. 2. Рельсовое скрепление типа SB3 (рис. выполнен на основе [2])

Fig. 2. Rail fastening SB3 (fig. prepared based on [2])

С целью проведения комплексных расчетов рельсовых скреплений типа SB решено использовать МКЭ. Это метод успешно используется для численных экспериментов, при помощи которых можно моделировать условия закрепления и эксплуатации рельсовых скреплений. В частности, в статьях [1, 3] МКЭ с успехом использовался для анализа напряженного состояния отдельных деталей рельсовых скреплений и их соединений.

Первоначально выполнялось геометрическое моделирование отдельных деталей рельсового скрепления типа SB-IF1 при помощи программного обеспечения Autodesk Inventor Professional. Указанные модели были выполнены на основе чертежей, содержащихся в документе [4]. Примеры таких деталей показаны на рис. 3.

3. ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ

Рельсовые крепления различных типов, а крепления типа SB в особенности, имеют достаточное количество взаимодействующих (контактирующих) между собой деталей. Следует объяснить, почему для указанного типа креплений контактная задача является существенной проблемой расчета. Дело в том, что значительное количество контактирующих между собой деталей имеют заранее неизвестную зону контакта. Это существенно удлиняет процесс решения задачи, которая требует для решения использование итерационного подхода. При этом время расчета увеличивается на порядок. При решении задач такого типа существуют некоторые подходы, которые позволяют уменьшить густоту КЭ сеток в контактной зоне, что позволяет существенно сократить время решения задачи.

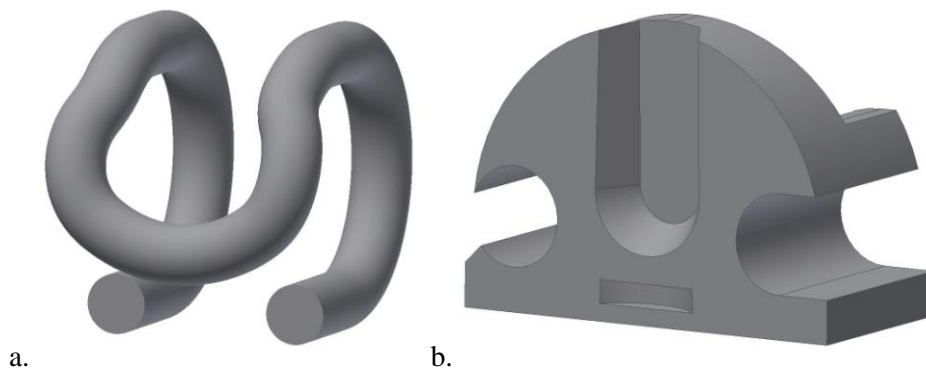


Рис. 3. Примеры геометрических моделей деталей рельсового крепления: а) пружинная клемма, б) головка анкера
 Fig. 3. Example of geometric models of rail fastening elements: a) spring clip, b) anchor head

В монографии [5] отмечалось, что для такого подхода большое значение имеет использование согласованных КЭ сеток контактирующих деталей. К сожалению, такое согласование не удастся выполнить в автоматическом режиме генерации КЭ сеток, а придется использовать полуавтоматические способы генерации. На рис. 4 показаны примеры неудачных КЭ дискретизаций отдельных элементов рельсовых креплений. Например, важным местом является зона контакта между клеммой и анкером. Как видно на рис. 2 клемма вставляется в пазы головки анкера. Соответственно, КЭ сетки клеммы и анкера должны быть согласованы и, соответственно, регулярны. Вполне очевидно, что поправить приведенную КЭ сетку анкера в местах такого соединения будет либо очень сложно, либо вообще невозможно.

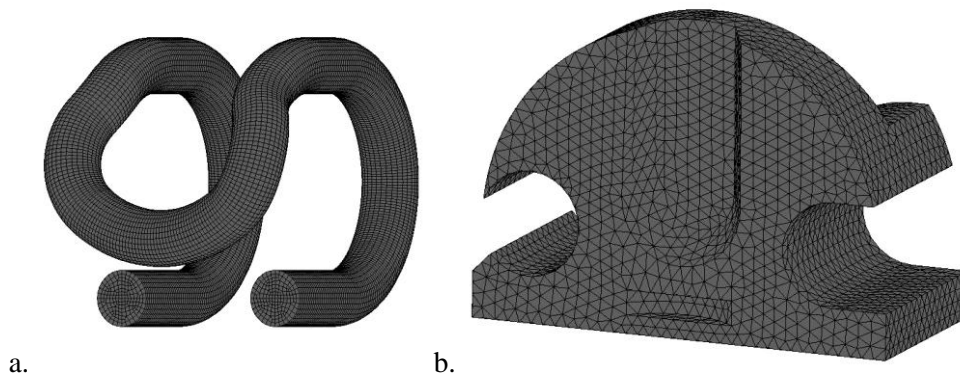


Рис. 4. Примеры КЭ моделей отдельных деталей рельсовых креплений: а) пружинная клемма, б) головка анкера
 Fig. 4. Example FE models of rail fastening elements: a) spring clip, b) anchor head

Таким образом, первой проблемой решения рассматриваемой задачи является генерация согласованных КЭ сеток. Такая задача может быть решена при помощи согласованного геометрического моделирования и полуавтоматической генерации сеток. Вторая проблема – это задание КЭ сеток с рациональным количеством узлов (степеней свободы). Если для задач линейного характера количество узлов для деталей или конструкций, которое превышает миллион, не является проблемой, то для задач нелинейного характера, а задачи с большим числом контактных зон относятся к классу высоконелинейных задач, количество узлов должно быть ограничено.

Рассмотрим генерацию КЭ сетки для пружинной клеммы. С этой целью в программе Inventor была создана базовая геометрия, которая содержала набор кривых: центральную, направляющую осевую линию, а также контур поперечного сечения (окружность), который был поделен на 4 сектора (рис. 5).

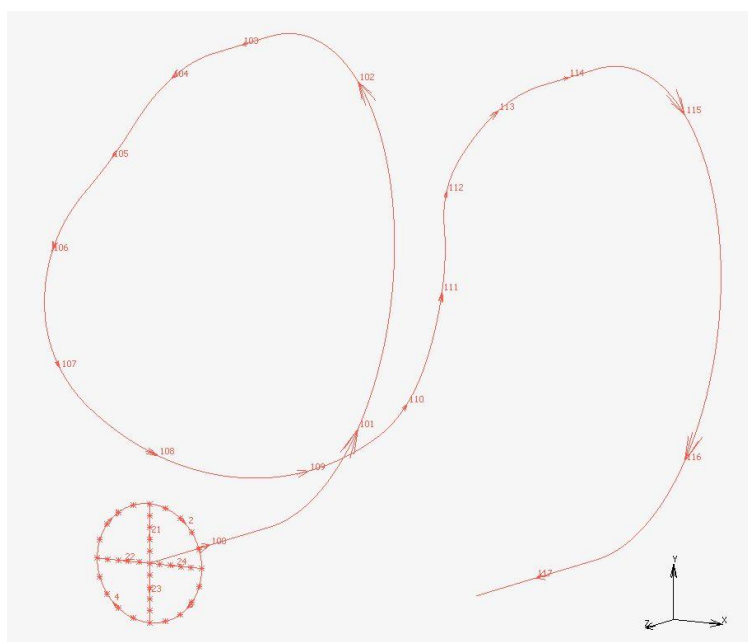


Рис. 5. Базовая геометрия пружинной клеммы

Fig. 5. Basic geometry of spring clip

В качестве основной программы для КЭ моделирования был выбран пакет MSC.MARC. Этот пакет имеет ряд существенных преимуществ. В нем достаточно просто реализуется задание контактных условий для задач подобного типа. Он является частично открытым, в том смысле, что определенные модули могут быть написаны пользователем, и затем при запуске на счет адаптированы основной программой. Еще одним преимуществом пакета является возможность написания дополнительных процедур, в которых можно достаточно просто изменять отдельные параметры модели. Например, рис. 5 показан уже после импорта геометрии в MSC.MARC. Количество узлов будущей КЭ сетки может регулироваться программно. Например, на контуре секторов поперечного сечения клеммы выбрано в рассматриваемом варианте по 5 элементов для каждой кривой. На рис. 6 для сравнения показаны КЭ сетки сгенерированные для описанного варианта (назовем его вариант 1) и для случая 8 элементов (вариант 2). Как видно из приведенного рисунка, увеличение количества элементов по радиусу сектора (см. также рис. 5) с 5 элементов до 8 приводит к увеличению общего количества узлов в поперечном сечении с 77 до 177. Если далее сохранить тот же шаг вдоль направляющей центральной кривой, то суммарное количество узлов для детали будет также увеличиваться пропорционально, с 37499 до 86199.

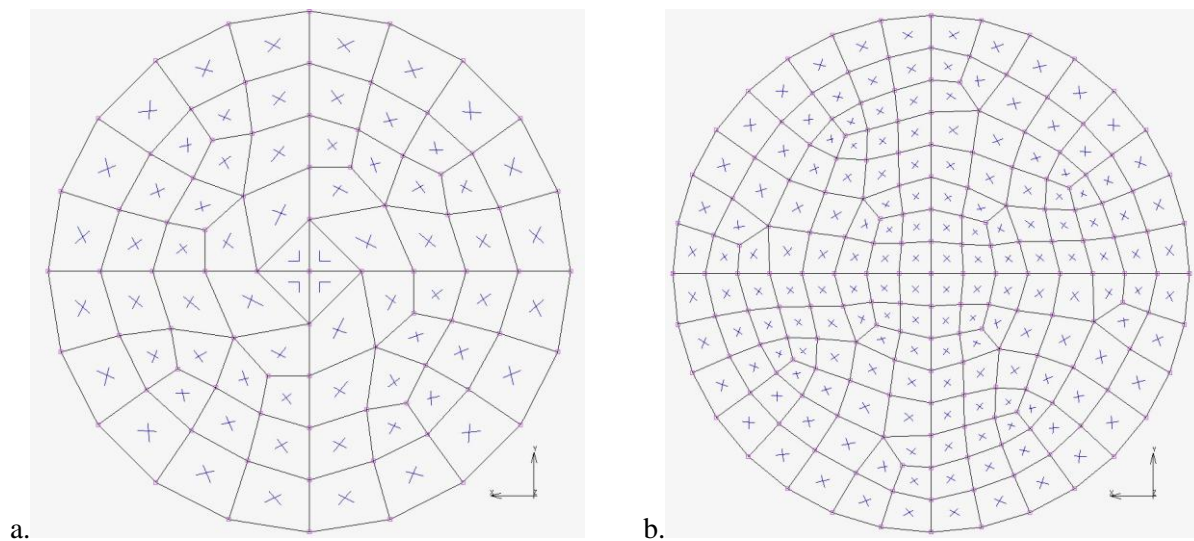


Рис. 6. КЭ сетка для поперечного сечения пружинной клеммы: а) вариант 1; б) вариант 2
 Fig. 6. FE mesh for cross section of spring clip: a) variant 1; b) variant 2

Таким образом, имеет место увеличение количества узлов в 2,3 раза. Очевидно, что аналогичным образом увеличивается число степеней свободы. Была решена тестовая задача о центральном нагружении клеммы распределенными узловыми силами, в то время как ее концы закреплены консольно. Указанная «заделка» моделировала закрепление клеммы в головке анкера. На рис. 7 показаны распределения эквивалентных напряжений по критерию Губера – Мизеса – Генки для первого варианта КЭ сетки.

Отметим, что изменение КЭ сетки для второго ее варианта не приводит к существенным изменениям характера распределения напряжений. Тем не менее, указанное изменение густоты сетки имеет существенное значение для времени расчета. В частности, КЭ модель клеммы согласно первого варианта имела общее время расчета равное 53,76 сек, при этом процессорное время расчета составляло 40,86 сек. Второй вариант имел намного большее время расчета, в частности, полное время расчета было равно 922,53 сек, а процессорное время 185,98. На рис. 8 представлено сравнение временных характеристик расчетов для двух рассмотренных вариантов. Расчеты проводились на компьютере с процессором Intel Core 2 Quad с тактовой частотой 2,4 ГГц. Оперативная память - 2 Гб. Операционная система - 32-битная Windows 7.

Проанализируем теперь, что является причиной столь значительного возрастания времени расчета. В этом может помочь рис. 8, где показаны длительности каждой операции при решении задачи с использованием МКЭ. Такой анализ показывает, что максимальное время, которое на порядок превышает время других операций, затрачивается на обработку (решение) матрицы системы уравнений. При этом описанное выше возрастание количества степеней свободы в 2,3 раза приводит к увеличению процессорного времени обработки матрицы в 6,81 раза. Этот результат следовало бы ожидать, поскольку при увеличении количества степеней свободы в 2,3 раза, так же увеличивается количество уравнений системы (с этих рассуждений не берем в расчет вопросы, связанные с заданием граничных условий). Соответственно, матрица системы, если бы ее рассматривать просто как квадратную, содержала бы в 5,29 раза больше значений и соответственно, требовала бы большего времени обработки. Тем не менее, матрица имеет разреженный характер, соответственно, обработка может осуществляться несколько дольше. И, тем не менее, задается вопрос, почему полное время обработки матриц возрастает в 39,45 раза! Ответ на данный вопрос может быть только один. Оперативной памяти для размещения больших матриц не хватает, соответственно, должны проводиться операции свопирования. С учетом того, что быстродействие твердого диска несоизмеримо с быстродействием оперативной памяти, при возрастании количества степеней свободы задачи резко растет общее время расчета.

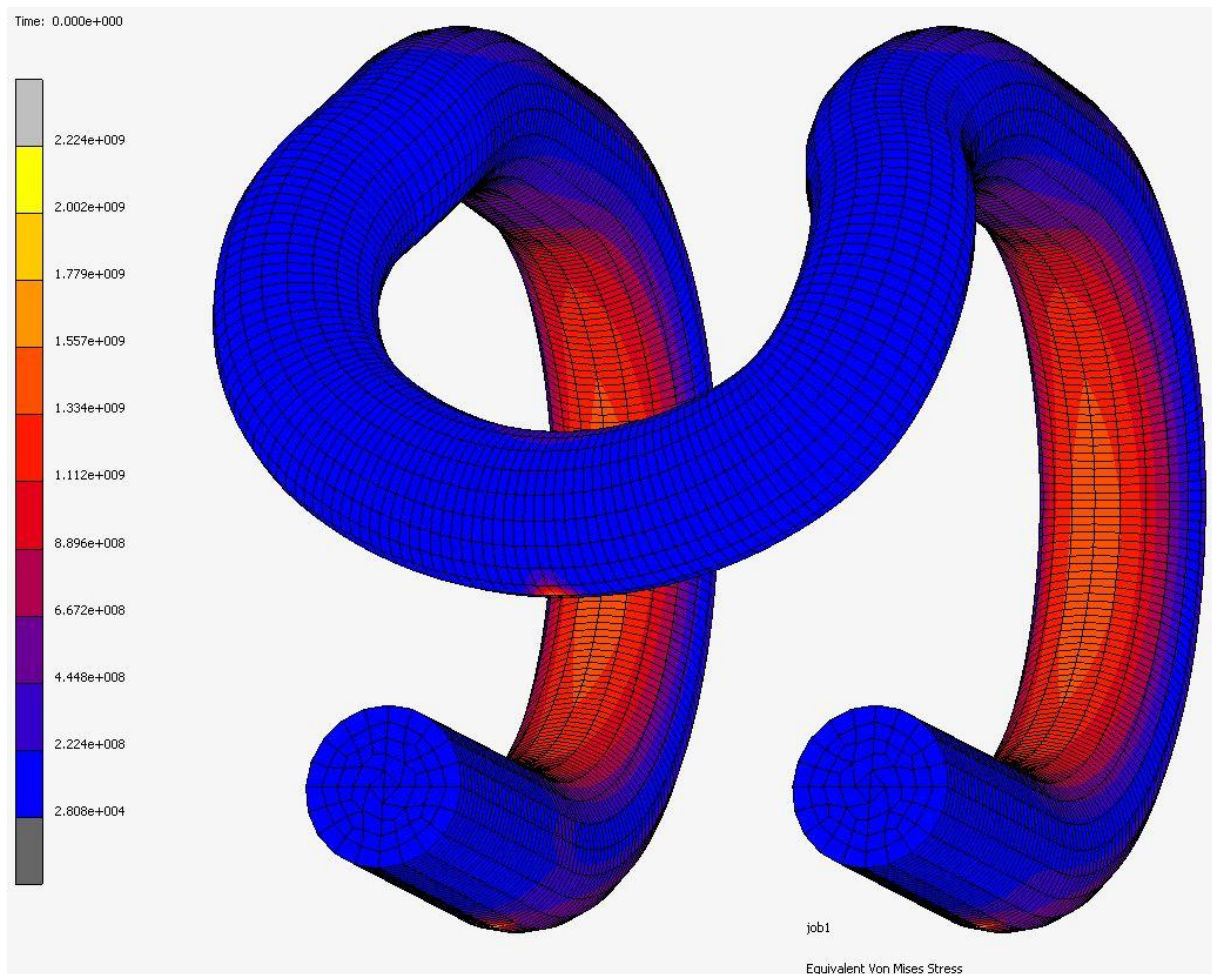


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений для 1 варианта КЭ сетки

Fig. 7. Distribution of equivalent stress for 1 variant of FE mesh

timing information:	wall time	cpu time
total time for input:	7.74	4.62
total time for stiffness assembly:	7.50	6.88
total time for stress recovery:	4.55	4.34
total time for matrix solution:	20.58	17.92
total time for output:	7.33	6.12
total time for miscellaneous:	6.07	0.98

total time:	53.76	40.86

a

timing information:	wall time	cpu time
total time for input:	14.64	11.76
total time for stiffness assembly:	16.69	15.99
total time for stress recovery:	30.71	12.43
total time for matrix solution:	811.89	121.99
total time for output:	27.00	21.76
total time for miscellaneous:	21.60	2.04

total time:	922.53	185.98

b

Рис. 8. Временные характеристики решения для варианта 1 (a) и для варианта 2 (b)

Fig. 8. Time characteristics of solutions for variant 1 (a) and for variant 2 (b)

4. ВЫВОДЫ

Расчеты такого сложного в механическом плане объекта, каковым является рельсовое скрепление, возможно только с учетом определенных особенностей данного узла. Следует предусмотреть рациональную генерацию КЭ сеток, с тем чтобы количество узлов, а соответственно, степеней свободы, для каждой детали было минимальным. Например, расчет всего узла в том случае, если бы использовался второй вариант генерации КЭ сетки для пружинной клеммы, а для других деталей созданы бы аналогичные КЭ сетки, был бы просто невозможен.

С другой стороны, сгенерированные КЭ сетки отдельных деталей должны быть согласованы в зонах возможного контакта. Предусмотреть такую КЭ дискретизацию можно только с использованием полуавтоматических методов генерации сеток, при которых проводится предварительное разбиение контактных зон с учетом согласованности сеток с поверхностями взаимодействующих деталей.

Литература

1. Śladkowski, A. Modeling of the deformation of elastic pads for rail fastenings. *Transport Problems*. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 63-70.
2. *Mocowanie sprężyste typu SB3*. Available at: <http://tramwar2.republika.pl/u-mocowanie-sb3.html>
3. Oczykowski, A. Badania i rozwój przytwierdzenia sprężystego SB. *Problemy kolejnictwa*. 2010. Z. 150. P. 121-156. [In Polish: Oczykowski, A. Research and development elastic fastenings SB. *Railways problems*. 2010. No. 150. P. 121-156].
4. *Aprobata techniczna AT/07-2014-0111-A1 – System przytwierdzeń SB-IF1*. Warszawa: Instytut Kolejnictwa. 2014.
5. Сладковский, А. *Контактное взаимодействие колес и рельсов*. Луганск: Русь. 2005. 189 p. ISBN 966-8051-19-X.