

Сведения о журнале

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал «*Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*» знакомит читателей с достижениями отечественных и зарубежных ученых в области геометрии пространственных конструкций, сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и расчета строительных и машиностроительных конструкций, освещает вопросы научно-технического прогресса в строительстве и машиностроении, публикует аналитические обзоры по теме журнала.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №ФС77-19706 от 13 апреля 2005 г. Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 20479.

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

АНДРЕЕВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (МГСУ, Москва),
БАЖЕНОВ В.А., акад. Национальной Академии педагогических наук Украины, д.т.н., профессор (КНУСА, Киев, Украина),
БОНДАРЕНКО В.М., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
ВАНИН В.В., д.т.н., профессор (Киевский политехнический университет, Украина),
ИВАНОВ С.П., д.т.н., профессор (ПГТУ – ВОЛГАТЕХ, Йошкар-Ола),
КАРПЕНКО Н.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
КОЛЧУНОВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (Госуниверситет-УНПК, Орел),
KRASIC SONJA, PhD (University of Nis, Nis, Serbia),
КРИВОШАПКО С.Н., д.т.н., профессор (РУДН, Москва),
ЛЯХОВИЧ Л.С., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ТГАСА, Томск),
ГРУДЕВ И.Д., д.т.н., профессор, почетный член РААСН (ЦНИИПСК, Москва),
ПОТАПОВ В.Д., д.т.н., профессор (МГУПС РФ (МИИТ), Москва),
САНЖАРОВСКИЙ Р.С., д.т.н., проф. (Евразийский Нац. У-т им. Гумилева, Казахстан),
ТРАВУШ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ЭНПИ, Москва),
ЯКУПОВ Н.М., чл- корр. РИА, д.т.н., профессор (ИММ КазНЦ РАН, Казань)

РЕДАКЦИЯ:

д.т.н., профессор С.Н. Кривошاپко – *главный редактор*,
д.т.н., профессор В.Н. Иванов – *зам. главного редактора*,
д.т.н. С.Е. Лисичкин; д.т.н., профессор Е.М. Зверьяев;
д.т.н., профессор В.И. Обозов; д.т.н., профессор В.П. Агапов;
И.А. Мамиева – *исполнительный редактор*;
доцент В.А. Романова – *редактор русскоязычного Интернет-сайта журнала*,
Е.А. Гринько – *редактор англоязычного Интернет-сайта журнала*.

Русскоязычный интернет-сайт журнала <http://stmj.rudn.ru>

Англоязычный интернет-сайт журнала <http://smjournal.narod.ru>

Технический секретарь *Е.М. Тупикова*

Компьютерная верстка *Т.И. Карелина*

Почтовый адрес журнала: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, РУДН,
каф. Прочности материалов и конструкций

Тел.: (495) 955-09-78; (495) 955-08-81; Факс: (495) 955-08-81; (495) 952-08-29

E.mail: sn_krivoshapko@mail.ru или i_mamieva@mail.ru

Тираж 300 экз.

Учредитель: Российский университет дружбы народов, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, РУДН

Типография ИПК РУДН, 117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

© Журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений», 2016
© Н.С. Кривошاپко, фото на 1-ой странице обложки (г. Синтра, Португалия)

Строительная механика инженерных конструкций и сооружений

Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6 тел.: (495) 955-09-78; FAX: (495)9520829

С о д е р ж а н и е

№ 1, 2016 год

Инженерная педагогика

Балыхин Г.А., Балыхин М.Г. Ускоренное обучение в высшем образовании как условие и механизмы непрерывного высшего образования: принципы и подходы..... 3

Расчет и проектирование строительных конструкций

Кривошапко С.Н. Вантовые структуры..... 9

Кузьмин П.К. Метод расчета ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях при изгибе..... 23

Романова В.А., Матвеев В.М. Визуализация движения точки контакта зубьев в цилиндрической зубчатой передаче..... 26

Численные методы расчета конструкций

Якупов С.Н., Насибуллин Т.Р. Анализ концентрации напряжений в тонкостенных элементах конструкций с локальным углублением..... 30

Хайруллин Ф.С., Сахбиев О.М. Метод определения напряженно-деформированного состояния трехмерных конструкций сложной формы.... 36

Кузьмин Д.А. Исследование влияния наплавки из аустенитной стали на раскрытие трещины в трубопроводе Ду850 из перлитной стали..... 42

Расчет и проектирование машиностроительных конструкций

Кохан Л.С., Морозов Ю.А., Славгородская Ю.Б. Напряженное состояние полосы в условиях одно- и двухзонной прокатки..... 49

Белюсов Ю.В. Определение остаточных напряжений при травлении консольно закрепленного образца..... 55

Остаточный ресурс эксплуатируемого объекта

Сухина К.Н., Пиеничкина В.А. Оценка остаточного ресурса основного корпуса Р-1 ОАО «Волтайр-Пром» как сложной системы..... 60

Экспериментальные исследования

Коффи Дж. АГБЕЛЕЛЕ, Жерар ГБАГУИДИ АЙССЕ, Абало П. КЛА, Жерар ДЕГАН. Физико-механические характеристики глинистых грунтов района Иссаба на юго-востоке Бенина..... 66

Шестопалов П.В. Расчетное определение физико-механических характеристик скального основания секции № 28 бетонной плотины Богучанской ГЭС..... 77

*Contents,
No 1, 2016*

Engineering education

- Balykhin G.A., Balykhin M.G.* Accelerated learning in higher education as a condition of a continuous and higher education: principles and approaches..... 3

Analysis and design of building structures

- Krivoshapko S.N.* Cable-stayed structures..... 9
- Kuzmin P.K.* The method of analysis of width of the crack openings in ferro-concrete structures under bending..... 23
- Romanova V.A., Matveev V.M.* Visualization of the movement of a contact point in cylinder cog-transmission..... 26

Numerical methods of analysis of structures

- Yakupov S.N., Nasibullin T.R.* Analysis of the stress concentration in thin-walled elements of structures with local in-depth..... 30
- Khayrullin F. S, Sahbiev O.M.* A method of determination of stress-strain state of 3D structures of complex form..... 36
- Kuzmin D.A.* Investigation of the influence of austenitic steel surfacing on crack opening of pearlitic steel pipeline Du850..... 42

Analysis and design of machine-building structures

- Kokhan L.S., Morozov Yu.A., Slavgorodskaya Yu.B.* Strip tension under conditions of one - and two-zonal rolling..... 49
- Belousov Yu.V.* Determination of residual stresses by etching cantilevered sample..... 55

Residual resource of operated building

- Suhina K.N., Pshenichkina V.A.* The evolution of residual resource of the main building R-1 of "Voltayr-Prom" as a complex structure..... 60

Experimental researches

- Koffi J. AGBELELE, Gérard GBAGUIDI AÏSSE, Abalo P' KLA, Gérard DEGAN.* Physic-mechanical characterization of the clayey soils of Issaba depression in the south-east of Benin..... 66
- Shestopalov P.V.* Settlement definition of physical-and-mechanical characteristics of rock foundations of the section № 28 of the concrete dam of Boguchanskaya HPS..... 77

Инженерная педагогика

УСКОРЕННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ КАК УСЛОВИЕ И МЕХАНИЗМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ: ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ

Г.А. БАЛЫХИН, д.э.н., профессор

М.Г. БАЛЫХИН, к.э.н., доцент

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологий», ул. Садовническая, 33с1, Москва, Россия, 115035; 9684176@gmail.com

Процесс ускоренного обучения отличается от традиционного процесса: педагог (наставник - учитель, преподаватель, инструктор) не только учит, а организует учебный процесс, в котором учащийся должен учиться сам, преподавание же выступает как управление конкретным процессом. Исследуя принципы, подходы непрерывного образования и педагогические пути, методики ускоренного обучения, авторы доказывают: какими средствами креативно-творчески преподаватель создаст условия, механизмы для учебного процесса, где студент учится и профессионально действует, активно овладевает экспериментальной и инновационной образовательной деятельностью в вузе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ускоренное обучение, непрерывность высшего образования, педагогические технологии, профессиональные технологии, глубокая интеграция, наставничество, принцип мобильности, принцип преемственности, малозатратность системы, интенсификации обучения на основе схемных моделей учебного материала, перспективно-опережающее обучение.

Интеграция России в мировое образовательное пространство, и в частности - европейское, оказалась важной с точки зрения создания условий и механизмов резкого увеличения экспорта образовательных услуг. Расширение экспорта образовательных услуг в последние десятилетия вошло в число приоритетов государственной политики ряда стран, как Великобритания, Франция, Германия, США, Австралия, Китай. Причин этому несколько.

Во-первых, подготовка специалистов для зарубежных стран становится одной из наиболее выгодных статей экспорта. **Во-вторых**, подготовка специалистов для других стран - это содействие реализации геополитических и экономических интересов страны. **В-третьих**, стремление привлечь иностранных студентов подталкивает вузы к реформированию системы подготовки специалистов с учетом требований мирового рынка труда; повышению качества обучения; разработке новых учебных программ и курсов с «включением международных компонентов», обеспечивающих подготовленность выпускников к работе в условиях глобальной экономики; и превращению **национальных университетов в международные научно-образовательные комплексы**. **В-четвертых**, к стремлению стран-экспортеров образования используются лучшие иностранные выпускники для развития экономики и науки своих стран.

Это означает, что непрерывное профессиональное образование, по сути, постоянное творческое обновление, развитие, совершенствование специалиста как личности, что непрерывность образования не соотносится только с субъектом, а связывается с образовательным процессом, который обладает признаками преемственности, с организационной структурой высшего (профессионального) образования, которая представляет собой взаимосвязь ряда образовательных ступеней и создает в совокупности пространство образовательных программ и услуг. Т.е. непрерывность образования обеспечивает возможность многомерного движения личности в конкретном профессиональном поле.

Системообразующим фактором непрерывного высшего образования выступает его целостность, под которой понимается не механическое приращение элементов, а глубокая интеграция всех подсистем, уровней, структур образовательного процесса. Не всегда и не всеми признавалась эта необходимость: до сих пор имеют место рассуждения о «конечности» профессионального образования, т.е. такой его организации, при которой знания и умения, полученные в высшей школе, сохраняют свою ценность на протяжении всей жизни. Современные и инновационные условия развития российского общества отмечают данные суждения. **Непрерывность образования** - это **аксиома**, но главное, что связывается данная аксиома и с организационными формами, и с содержанием профессионального образования.

Перспективами развития подготовки будущего специалиста как потенциального специалиста являются целенаправленные программы, которые бы учитывали практические, производственные нужды в процессе его подготовки в стенах высшей школы и брали на себя миссию доучивания, адаптации начинающего работника. Высокая мотивированность нужных программ зависит от учета потребностей будущих специалистов, от согласованности подобных программ поддержки с программами университетского образования (к примеру, в зарубежном и российском опыте сложилась самостоятельная концепция наставничества-менторинга, исследующая и воплощающая в практику проблему адаптации человека в профессии).

Насколько выше сказанное связано с ускоренным обучением будущих профессионалов-педагогов? Важнее всего не элементарная начитанность, не просто многознание, а качество способность человека осуществлять различной сложности логические и умственные действия, творчески оперируя имеющимися знаниями, умение мыслить, добывая логическим путем новые знания. Это методики, рекомендации перечня и сценариев учебно-методических средств, обеспечивающих полную ориентировку в той деятельности, которую предстоит освоить обучаемым, то есть 1) средства, образующие ориентировочную основу действия (схема ООД) по правильному решению задач, составляющих в совокупности осваиваемую деятельность; 2) набор профессионально-ориентированных задач, при решении которых следует научить студентов выполнению формируемой деятельности. Первые ориентируют учащихся в логике и технологии деятельности, вторые - в разнообразном содержании деятельности, т.е. в многообразии полных, исчерпывающих подходов, принципов, заданий, которые решаются при ориентировки действий и деятельности (см.: Нечаев Н.Н. Психолого-педагогические основы формулирования профессиональной деятельности. М., 1988. - С. 160-161).

Процесс ускоренного обучения отличается от традиционного процесса: педагог (наставник - учитель, преподаватель, инструктор) не только учит, но также организует учебный процесс, в котором студент учится и сам, преподавание же выступает как управление конкретным процессом. Т.е. преподаватель создает возможность студенту учиться самому, помогает профессионально действовать, активно овладевать деятельностью. Это должно обеспечиваться высоким качеством учебно- и научно-методических средств, подкрепленных прочными и глубокими знаниями, гарантирующими сознательность обучения. Иными словами, будущие профессиональные умения, навыки не передаются учащимся «из рук в руки». Знания, умения, навыки должны формироваться в безошибочной деятельности, умело организуемой педагогом (см.: Психология подготовки специалистов для современного производства/ Под редакцией А.И. Подольского. - М., 1991).

Малозатратность системы обучения, являющаяся следствием ее оптимизации, не только экономически выгодна обществу, но и более приемлема для обучающихся. Поэтому в деле подготовки кадров следует решить в комплексе три задачи: ускорить обучение, поднять качество и удешевить сам процесс. Для этого нужен научный подход, позволяющий взглянуть на проблему с новой, непривычной позиции. Тем не менее, каждая отрасль, ведомство, каждый специализированный учебный центр идут «своим путем», обучая банковского служащего, бухгалтера, менеджера, конструктора и т.д. Есть общая теория профессионального обучения, но нет конкретных научно-обоснованных методик. В вузе в большинстве случаев обучают примерно так же, как на уроках в школе: рассказ (лекция) и показ, опрос, новый материал, опять - рассказ (лекция) и показ и т.д., и в таком порядке до конкретного обучения.

К истории образовательной античности. Напомним, что содержание высшего образования впервые четко оформилось в период античности. Уже в государствах Древнего Востока, т.е. в раннеклассовом обществе, велось особое обучение для лиц, готовящих себя к деятельности на высших ступенях социальной иерархии.

Платоном впервые выделяются разные ступени обучения - элементарная, средняя, высшая. Древнегреческий идеал образования признавал достойными только предметы, способствующие духовному совершенствованию человека. В связи с этим основой обучения был признан канон «круга знаний», или «энциклопедий» позже в Древнем Риме получивший название семи искусств. После овладения этим каноном остальное обучение сосредоточивалось в специальной подготовке по философии (мнение Платона), по риторике (мнение Сократа), в выработке ориентаций по предметам и выработке способностей к самостоятельному суждению (мнение Аристотеля).

Действительно, важнейшим этапом в формировании образовательных ступеней стало возникновение первых университетов как корпораций ученых нескольких специальностей и школяров, избравших для будущей профессиональной деятельности богословский, медицинский, юридический факультеты. Средневековые университеты унаследовали организацию обучения, сложившуюся еще во времена античности, когда прообразом высших учебных заведений были философские школы, преподавание в которых ориентировалось на осмысление известной совокупности теоретических знаний, а формами занятий были лекции (чтение книг определенного автора и их комментариев с целью усвоения скрытого смысла), квестии (разновидность лекции - публичное изложение через рассмотрение вариантов ответов на поставленный вопрос), беседа и диспут, нацеленные на развитие самостоятельного мышления.

Тогда высоко оценивались университеты. Их называли *«Рекой, питающей мир»*, *«Хранилищем ключей от Христианства»*, *«Старшей дочерью короля»*. Метафоры делали свое дело, умножая значение университетов в средневековой культуре и системе ступенчатого образования. Университеты желали происходить от легендарных королей. Утверждали, что Парижский университет основал Карл Великий. Кембриджский — король Артур, а Оксфордский - Альфред Великий.

Среди студентов в средневековом университете можно было встретить как подростков, так и убеленных сединами старцев. Обучение чаще начиналось с 15 лет. На теологическом факультете, где обучение длилось от 12 до 15 лет, последовательно обретались степени «курсора» (бакалавра-репетитора), «библикуса» (комментирующего Библию), сентенциария (допущенного преподавать по книге «сентенции» Петра Ломбардского, в которой согласовывались мнения авторитетов по спорным вопросам богословия), бакалавра-формата (участвующего во всех диспутах), лиценциата (обладателя права преподавать повсюду) и наконец, степень доктора богословия, означавшая наивысшую компетентность.

Принципы и формы преподавания во многих университетах Западной Европы были схожи. Утром читались курсорные лекции: преподаватель зачитывал текст книги, затем выделял основную проблему и разбивал ее на подвопросы. На вечерних лекциях другие преподаватели растолковывали, повторяли утреннюю тему либо останавливались на специальных вопросах. Умение выделять вопросы (*questio*) считалось важнейшим. Ежедневно проводились ординарные диспуты. Событием, привлекавшим много публики, были диспуты - кводлибеты (спор о чем угодно, в том числе о злободневных политических вопросах).

Какой сегодняшний год в высшем образовании? После окончания курсов выпускники, как правило, не готовы к самостоятельному выполнению ответственных профессиональных функций по полученной специальности. Так называемое «доучивание на рабочем (профессиональном) месте» трудно считать естественным, хотя является привычным и кажется неизбежным: практика массового обучения занята сиюминутными, неотложными, сугубо конкретными задачами, отсутствуют возможности для практико-теоретических изысканий, отвлеченных от повседневных дел.

Какие же закономерности учения позволяет сделать обучение правильным? Педагогическая технология - это продуманная во всех деталях модель совместной педагогической деятельности по проектированию, организации и проведению учебного процесса с безусловным обеспечением комфортных условий для учащихся и учителя. **Определение ЮНЕСКО:** педагогические технологии - это систематический метод планирования, применения и оценивания всего процесса обучения и усвоения знаний путем учета человеческих и технических ресурсов и взаимодействия между ними для достижения более эффективной формы образования.

Вернемся к принципам наиболее актуальным и нужным для высшего образования. К ним относятся: *принцип мобильности* (маневренности), подразумевающий получение новых знаний, новой информации о профессиональных технологиях в быстроменяющихся социально-экономических условиях (ускоренное обучение), с уточнением специалистом своего профессионального выбора; *принцип преемственности*, означающий, что «выход» из одной образовательной программы должен «состыковываться» с «входом» в последующую. Такое согласование разумнее обеспечить через стандартизацию профессиональных образовательных программ путем выявления единых целей всей системы непрерывного профессионального образования и частных задач отдельных его звеньев. Обязателен и *принцип интеграции*, связанный с усложнением характера деятельности современного профессионала через синтез знаний, получаемых на разных этапах обучения, через выделения системы ближайших, ближних, дальних профессиональных целей и их распределения между разными уровнями профессионального образования. Однако и аргументация бывает иной, что настоящий специалист - это «самоучка» и занимается самообразованием всю профессиональную жизнь.

Возникает вопрос: как научиться в высшем образовании «делать дело со знанием дела»? В связи с этим следует рассмотреть, какое влияние на перестройку структуры и направления деятельности российских вузов оказали зарубежные модели университетского образования.

Например, основную часть общеобразовательной, общенаучной подготовки студенты США получают в академических колледжах, университетах - с преимущественно теоретическим обучением в течение 3-5 лет. По окончании академического колледжа студенты обретают первую ученую степень бакалавра, которая дает право на занятие профессиональной деятельностью и на дальнейшее обучение в университетах до получения степеней магистра и доктора. Если же профиль обучения в вузе носит не собственно научный, а практический характер, то по окончании второй ступени выдается диплом по специализации.

В Великобритании в самостоятельных отраслевых колледжах срок обучения составляет 3-4 года. После этого выпускник должен отработать определенное время (около двух лет) по избранной специальности и пройти аттестацию в профессиональном обществе. Подготовка к соисканию ученых степеней (магистра) осуществляется в системе последующего двухгодичного образования.

Во Франции распространена образовательная система, сочетающая университеты и специализированные вузы, среди которых выделяется группа высших школ. В вузы принимаются выпу-

скинки общеобразовательных средних школ, имеющие диплом бакалавра. Курс обучения в вузе составляет 4-6 лет, делится на три цикла: подготовительный (до двух лет), общий (с зачислением по конкурсу, обучение длится 3-4 года и заканчивается присуждением ученой степени лицензиата и получением государственного диплома «общих научных знаний») и специализированный цикл, который длится 1-2 года и заканчивается итоговым экзаменом и получением диплома «высшего научного образования». Последний дает право на продолжение «углубленных знаний по определенной специальности», а также степени доктора по специальности.

Что касается России, в соответствии с законодательством Российской Федерации (Федеральный закон Российской Федерации от 29 декабря 2012 г. N 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации») могут создаваться и действовать научно-исследовательские и проектные организации, конструкторские бюро, учебно-опытные хозяйства, опытные станции, организации, осуществляющие научно-методическое, методическое, ресурсное и информационно-технологическое обеспечение образовательной деятельности и управления системой образования, оценку качества образования. Кроме того, экспериментальная образовательная деятельность направлена на разработку, апробацию и внедрение новых образовательных технологий, образовательных ресурсов и осуществляется в форме экспериментов. Инновационная же деятельность ориентирована на совершенствование научно-педагогического, учебно-методического, организационного, правового, финансово-экономического, кадрового, материально-технического обеспечения системы образования и осуществляется в форме реализации инновационных проектов и программ.

Каковы признаки педагогической технологии в высшем образовании? К признакам *педагогических технологий* относим 1) цели (во имя чего необходимо преподавателю ее применять); 2) наличие диагностических средств; 3) закономерности структурирования взаимодействия педагога и учащихся, позволяющие проектировать (программировать) образовательный процесс; 4) система средств и условий, гарантирующих достижение образовательных, педагогических целей; 5) средства анализа процесса и результатов деятельности преподавателя и студентов.

К современным инновационным технологиям в образовании мы относим *информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) в предметном обучении, лично - ориентированные технологии в преподавании дисциплины, информационно - аналитическое обеспечение учебно-образовательного процесса и управление качеством образования студентов, мониторинг интеллектуального формирования учащихся, дидактические технологии как условие развития и продвижения учебного (образовательного) процесса, в том числе - воспитательное и психолого-педагогическое сопровождение внедрения инновационных технологий в образовательный процесс вуза.*

В качестве примеров современных педагогических технологий для модернизации образования относятся и *проблемное обучение* как педагогическая технология на основе активизации и интенсификации деятельности студентов, *технология интенсификации обучения* на основе схемных моделей учебного материала. Среди педагогических технологий на основе эффективности управления и организации образовательного процесса наиболее передовыми являются: перспективно-опережающее обучение с использованием опорных схем при комментируемом управлении, уровневая дифференциация обучения на основе обязательных результатов (В. Фирсов), технология индивидуализации обучения (Инге Унт, В. Шадриков), коллективный способ (кооперативный) обучения КСО (А.Ривин, В.Дьяченко), новые информационные технологии обучения и образования.

Л и т е р а т у р а

1. *Балыхин Г.А.* Управление развитием образования: организационно-экономический аспект: Монография. – М.: «Экономика», 2003. – 428 с.
2. *Балыхин Г.А., Бердашкевич А.П., Калинин А.В.* Становление системы непрерывного образования в России: законодательное и экономическое обеспечение: Монография. – М.: Изд. Государственной Думы, 2012. – 190 с.
3. *Балыхин Г.А., Балыхин М.Г.* Инновационный человек как путь и способ достижения глобально конкурентного образовательного преимущества России// *Life Science Journal*, 2014. - № 11. – с. 173-176.
4. *Балыхин М.Г.* Инновационная практика обучения взрослых в контексте развития международного рынка образовательных услуг// *LEuropa dell e lingue e il russo: certificazione, e istituzioni e strumenti per uno nuova mediazione.* Universitata di Bologna. Bologna: Universitata di Bologna, 2008. – С. 151 – 157.
5. *Нечаев Н.Н.* Психолого-педагогические основы формулирования профессиональной деятельности. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 165 с.
6. Психология подготовки специалистов для современного производства / Под редакцией А.И.Подольского. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 183 с.
7. Федеральный закон Российской Федерации от 29 декабря 2012 г. N 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», 2012.

R e f e r e n c e s

1. *Balykhin, G.A. (2003). Upravlenie Razvitiem Obrazovaniya: Organizacionno-Ekonomicheskij Aspect: Monografiya, Moscow: 'Ekonomika', 428 p.*
2. *Balykhin, G.A., Berdashkevich, A.P., Kalinin, A.V. (2012). Stanovlenie Sistemy Nepreryvnogo Obrazovaniya v Rossii: Zakonodatelnoe i Ehkonomicheskoe Obespechenie: Monografiya, Moscow: Izd. Gosudarstvennoj Dumy, 190 p.*
3. *Balykhin, G.A., Balykhin M.G. (2014). Innovacionnyj chelovek kak put i sposob dostizheniya global'no konkurentnogo obrazovatel'nogo preimushchestva Rossii, Life Science Journal, № 11, p. 173-176.*
4. *Balykhin, M.G. (2008). Innovacionnaya praktika obucheniya vzroslyh v kontekste razvitiya mezhdunarodnogo rynka obrazovatel'nyh uslug, LEuropa dell e lingue e il russo: certificazione, e istituzioni e strumenti per uno nuova mediazione. Universitata di Bologna, Bologna: Universitata di Bologna, 2008, p. 151 – 157.*
5. *Nechaev, N.N. (1988). Psihologo-Pedagogicheskie Osnovy Formulirovaniya Professionalnoj Deyatel'nosti, Moscow: Izd-vo MGU, 165 p.*
6. *Psihologiya Podgotovki Specialistov dlya Sovremennogo Proizvodstva, Pod redakciej A.I. Podolskogo, Moscow: Izd-vo MGU, 1991, 183 p.*
7. *Federalnyj Zakon Rossijskoj Federacii ot 29 Dekabrya 2012 g. N 273-FZ «Ob Obrazovanii v Rossijskoj Federacii», 2012.*

ACCELERATED LEARNING IN HIGHER EDUCATION AS A CONDITION OF A CONTINUOUS AND HIGHER EDUCATION: PRINCIPLES AND APPROACHES

Balykhin G.A., Balykhin M.G.

FGBOU VPO "Moscow State University of Design and Technology"

The process of accelerated learning is differ than the traditional process: the teacher (mentor - a teacher, lecturer, instructor) not only teaches but organizes the educational process in which the student has to learn himself, teaching the same acts as the management of a specific process. Exploring the principles, approaches, continuing education and pedagogical way accelerated learning techniques, the authors argue: by what kind of creative and imaginative facilities teacher will create the conditions, mechanisms for the learning process where the student learns and acts professionally, actively masters of experimental and innovative educational activities at the university.

KEYWORDS: accelerated learning, the continuity of higher education, educational technology, professional technology, deep integration, mentoring, mobility principle, the principle of continuity, cost-effective system, the intensification of training on the basis of circuit models of educational material forward-advancing training.

Расчет и проектирование строительных конструкций

ВАНТОВЫЕ СТРУКТУРЫ

С.Н. КРИВОШАПКО, д.т.н., профессор,
Российский университет дружбы народов, Москва
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; *sn_krivoshapko@mail.ru*

Вантовые конструкции просты в монтаже, легкие по весу, надежны в эксплуатации, а во многих случаях отличаются и архитектурной выразительностью. Представлены наиболее знаковые конструкции и сооружения всех типов, согласно предложенной классификации, имевшие на момент строительства практическую значимость и новизну, отмеченные наградами профессионального сообщества или вошедшие в рейтинги научных журналов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: висячие структуры, вантовые структуры, висячая вантовая структура, подвесное вантовое покрытие, ванта, пилон, висячие мосты.

Введение

В висячих конструкциях внешнюю нагрузку воспринимают тросы (стальные канаты), кабели, цепи, прокатный металл и листовые мембраны, работающие только на растяжение. В висячих вантовых системах ванты (нити) или тросовые плоские, или пространственные фермы поддерживают жесткие элементы (балки, плиты, арки, рамы), работающие на изгиб, в проектном положении, а уже на эти жесткие элементы укладывают ограждающие конструкции. К вантовым структурам, помимо висячих вантовых систем, будем относить также конструкции, в которых ванты являются стабилизирующими элементами или участвуют в создании геометрического образа сооружения. Простейшей вантовой структурой можно было бы считать *идеальную нить*, т.е. нить, которая не оказывает сопротивления изгибу и кручению. Однако архитекторы считают, что оставаясь всегда прямолинейными, ванты не принадлежат к семейству гибких нитей [1].

Висячие тросовые конструкции (тросовые сети) отличаются от вантовых систем тем, ограждающие элементы в них укладываются непосредственно на тросы или тросовую сеть. Ванты иногда называют *открытыми тросами*. В работе [2] приводится классификация висячих тросовых конструкций.

Учитывая, что ванты – это открытые тросы, можно предложить следующую классификацию вантовых структур в зависимости от их конструктивных особенностей и назначения:

- висячие вантовые структуры, поддерживающие в отдельных точках тентовые покрытия,
- вантовые стабилизирующие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий,
- подвесные (висячие) вантовые покрытия с одной несущей стойкой (пилоном),
- подвесные вантово-стержневые покрытия с несущими стойками в один или несколько рядов,
- висячие вантово-арочные (арочно-вантовые) покрытия,
- консольно-вантовые системы,
- вантовые конструкции башенного типа в форме однополостного гиперболоида, с вантами, совпадающими с прямыми образующими однополостного гиперболоида,
- тросовые оттяжки высоких мачт,
- висячие мосты.

Как видно из классификации висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений, в рассматриваемую группу сооружений не включены, хотя вместе с мембранными покрытиями они составляют более широкий класс висячих конструкций. В.В. Ермолов [1] привел в табличной форме основные схемы установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях (рис. 1).

Тросовые и вантовые конструкции позволяют перекрывать пролёты более 200 м, однако обычно диапазон перекрываемых пролётов составляет 50-150 м. Ванты висячих конструкций, как правило, - это тросы одинарной или двойной свивки, изготовленные из высокопрочной проволоки диаметром 4-6 мм. Проволока меньших диаметров не рекомендуется, что обусловлено ее пониженной коррозионной стойкостью [3]. В зависимости от касания между собой проволок тросы делятся на тросы с точечным (ТК) и линейным (ЛК) касанием проволок. Канаты типа ТК более жесткие, чем типа ЛК.

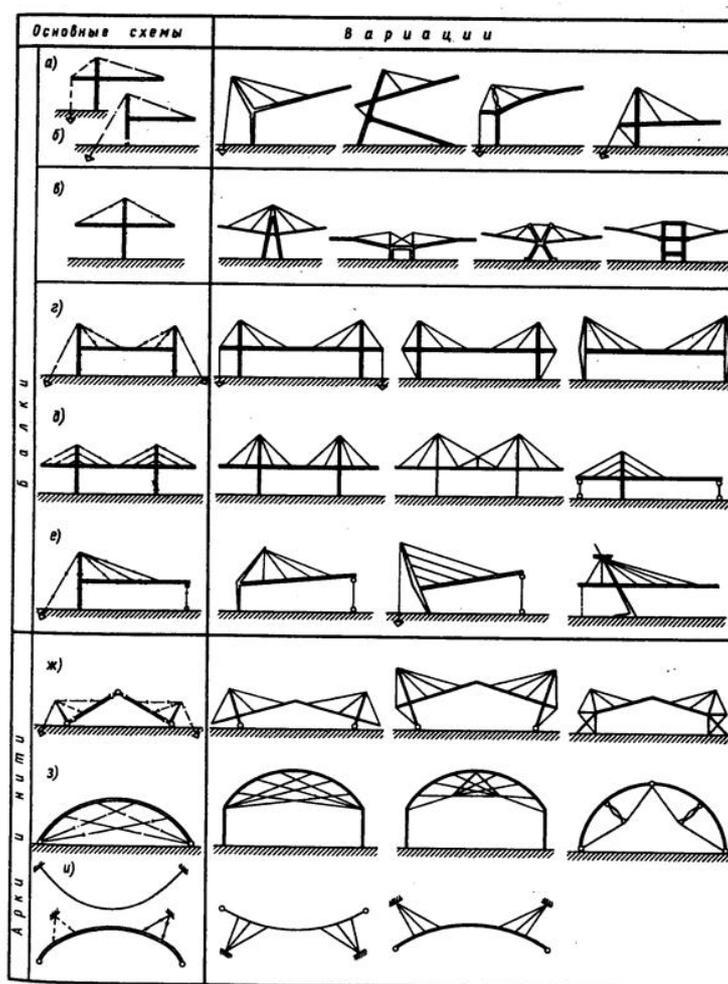


Рис. 1. Схемы установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях

Наклонные ванты расходятся лучами из верхних точек пилонов. Часто ванты идут параллельно друг другу по схеме «арфа». Углы наклона вант должны быть не менее 30° , в исключительных случаях до 25° .

Считается, что ванты сохраняют прямолинейную форму, поэтому их можно изготавливать из стержней, полос, профилей и т.д.

Ванты расположены снаружи на открытом воздухе, поэтому они требуют эффективной защиты от возможной коррозии. Принимаемые меры по защите вант от коррозии будут рассмотрены в дальнейшем на конкретных примерах возведенных сооружений. Другим существенным фактором, влияющим на эксплуатационные свойства вантовых покрытий, являются принятые решения для узлов прохода подвесок через кровлю, которые достаточно сложны и требуют высококачественного исполнения работ, гарантирующего отсутствие протечек.

Рассмотрим примеры реальных вантовых сооружений согласно предложенной классификации, построенные преимущественно в конце XX и начале XXI века. Очень интересные сведения о висячих структурах, реализованных в проектах или натуре в XIX и XX веках, можно найти в книге [4].

Висячие вантовые структуры, поддерживаемые в отдельных точках тентовые покрытия

Для иллюстрации сооружений этого типа можно привести куполообразную крышу Национального теннисного центра в Лондоне, Великобритания. Покрытие перекрывает 11500 м² плана. Под ним расположены объемные структуры различного назначения (6 кортов для игры в теннис, специализированная гимназия, спортивная клиника, помещения для тренеров и т.д.). Одна из объемных структур перекрыта тентовой конструкцией, которая поддерживается системой вант с двумя трубчатыми опорами (рис. 2).



Рис. 2. The Lawn Tennis Association's National Tennis Centre (Hopkins Architects), Великобритания, Лондон, 2008

или пластиковых ремешков. Использование вант позволило отказаться от массивного каркаса с нагромождением металлических ферм и балок, которые задавали бы воздушную легкость тентового полотна [Ф. Надежный, <http://www.teniradi.ru>].



Рис. 3. Тентово-вантовое летнее кафе



Рис. 4. Фрагмент покрытия Олимпийского стадиона в Мюнхене, Германия

Конструкции рассмотренного типа могут быть причислены как к тентовым структурам, так и к висячим вантовым структурам. Дополнительные примеры висячих тентово-вантовых структур приведены в работах [5, 6].

К этой же группе висячих вантовых структур причисляются покрытия из материала, не являющегося тентом, но работающим тоже только на растяжение.

Ярким представителем этих структур является покрытие Олимпийского стадиона в Мюнхене, Германия (рис. 4). Стадион был построен в 1972 году, архитекторы Фрей Отто (Frei Otto) и Гюнтер Бениш (Gunter Behnisch).

Вантовые стабилизирующие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий

Данный вид вантовых конструкций является комбинированной структурой, которая включает в себя висячее тросовое покрытие, и имеет в своем составе несколько вант, которые являются стабилизирующими (рис. 5). Конструкции такого типа могут быть причислены, как к тросовым висячим структурам, так и к висячим вантовым структурам. При конструировании сооружений этого типа особое внимание необходимо уделить анкерам – устройствам, служащим для передачи усилий от основной конструкции на грунтовую основу.



Рис. 5. Тросово-вантовая структура

Подвесные (висячие) вантовые покрытия с одной несущей стойкой (пилоном)

Крытый конькобежный центр «Крылатское» (ледовый дворец в Крылатском) - крупнейшее в Европе сооружение этого типа, открыт в 2006 году. Здесь покрытие с помощью вант подвешено к одной \square -образной опоре, установленной на оси симметрии сооружения со смещением вдоль этой же оси (рис. 6). Две оттяжки опоры обеспечивают равновесие всей вантовой системы. В конце 2007 года в ледовом дворце возникла аварийная ситуация из-за провисания крыши. Было установлено, что причиной аварийной ситуации стал брак, допущенный при изготовлении металлических конструкций. Аналогичная схема подвески стальной стержневой прямоугольной плиты покрытия с помощью вант к единственной вертикальной стальной стойке применено к сооружению в Ля-Рашели, Франция (Ré Island Toll Gate, La Rochelle, Poitou-Charente). С учетом смещения опоры по отношению к центру плиты покрытия два ближайших к стойке угла плиты заанкерены в землю.



Рис. 6. Вид на ледовый дворец в Крылатском, Москва, со стороны единственного пилона.

Аналогичная схема подвески стальной стержневой прямоугольной плиты покрытия с помощью вант к единственной вертикальной стальной стойке применено к сооружению в Ля-Рашели, Франция (Ré Island Toll Gate, La Rochelle, Poitou-Charente). С учетом смещения опоры по отношению к центру плиты покрытия два ближайших к стойке угла плиты заанкерены в землю.

Подвесные вантово-стержневые покрытия с несущими стойками в один или несколько рядов



Рис. 7. Павильон Великобритании на ЭКСПО-70 в Осаке, Япония



Рис. 8. Технологический центр в Принстоне, США [8]

Этот тип вантовых покрытий считается наиболее простым и распространенным, часто эти покрытия называют *вантово-балочным*. Здесь балка жесткости поддерживается вантами в одной или нескольких точках. Ванты закрепляются на *стойках*, которые расчлены в поперечном и продольном направлении.

Павильон Великобритании на ЭКСПО-70 в Осаке представляет собой однорядную систему из 4-х стальных рам высотой 34 м, к которым с помощью подвесок подвешена несущая конструкция крыши и стеновое ограждение (рис. 7).

Однорядная система из трех колонн, к которым в одном уровне прикреплены ванты, поддерживающие покрытие в двух направлениях описаны в статье [7] на примере одного из вантовых сооружений в Риме (Italtubi warehouse), Италия.

Необычное здание Технологического центра в Принстоне (the PA Technology Center in Princeton, NJ, North America) запроектировано архитектором Р. Роджерсом (Richard Rogers) в стиле «хай тэк» (the high tech architecture movement) в период его наибольшей популярности, который пришелся на 1960-1990 годы. Здание построено в 1982 году. Архитектор отказался от традиционных колонн и балок в пользу стальных конструкций, обычно применяемых в мосто-



Рис. 9. Подвесная крыша в Лионе (suspended greenroof in Lyons, photo by Haven Kiers)

подвесное вантовое покрытие с зеленой крышей в Штутгарте, Германия (рис. 10). В настоящее время там находится Общественная транспортная компания (the public transportation company).

Часто подвесные вантово-балочные покрытия под-

строении и при проектировании подъемных кранов (рис. 8). Модули (блоки) сооружения предварительно изготавливались на заводе, что значительно сократили сроки строительства.

Обратим внимание на интересное направление в архитектуре вантовых подвесных покрытий – строительство «зеленых крыш». Например, в Южной Франции в Леоне архитекторы Jourda и Perraudin создали подвесное покрытие площадью 8000 м² в форме зонтичной поверхности. На крыше растут дикие цветы и трава (рис. 9). Под этой крышей находятся аудитории международной школы. Еще большую площадь перекрывает



Рис. 10. Зеленая крыша в Штутгарте (Green roof Service LLC, Stuttgart, Germany, photo by G. Breuning)



Рис. 11. Атлетический центр университета Чикаго, США



Рис. 12. Покрытие железнодорожной станции, Nanjing, Jiangsu Province, Китай

разделяют на три вида: а) подвесное покрытие с поперечной вантовой системой и двумя рядами несущих стоек (рис. 11); б) подвесное покрытие с поперечной вантовой системой и центральным рядом несущих стоек (рис. 7, 12); в) подвесное покрытие с продольной вантовой системой с одним или несколькими рядами несущих стоек (рис. 10, рис. 13).

Первое подвесное покрытие с кровлей из прозрачной пластмассы было построено над автобусной остановкой в Милане (Италия) в 1949 году. Наклонное покрытие системой вант подвешено к наклонным же несущим стойкам. Равновесие достигается специальными оттяжками, прикрепленными к краям покрытия.

Атлетический центр университета Чикаго (The Gerald R.ather Athletics Center of the University of Chicago) уникален тем, что здесь впервые применены несимметричные композитные стойки для крепления вант (рис. 11, рис. 14). Инновационное решение позволило перекрыть большую площадь, свыше 20000 фут². Отказ от применения железобетона, по мнению авторов проекта (Cesar Pelli & Associates teamed with OWP/P), дал ряд преимуществ, в том числе, по стоимости сооружения. Стойки наклонены под углом 10° к вертикали, как из эстетических соображений, так и из условий работы асимметричной конструкции [9]. Каждая стойка держит 3 искривленные балки (рис. 14). К большой стойке крепятся 3 ванты, а к малой – одна ванта.



Рис. 13. Подвесное покрытие с продольной вантовой системой, Милан, Италия

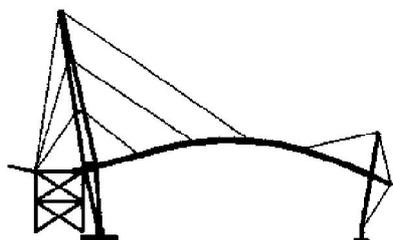


Рис. 14. Схема установки стоек атлетического центра университета Чикаго

Несущие ванты – тросы имеют диаметр 57 мм [10]. Схема размещения стоек и вант стадиона в г. Скво-Вэлли представлена на рис. 1 (шестая строка, второй столбец).

Схема трехшарнирной вантовой системы покрытия над катком в г. Брауншвейге (ФРГ) представлена на рис. 1 в шестой строке, в третьем столбце.

Классическое решение подвесного покрытия с поперечной вантовой системой и двумя рядами несущих вертикальных стоек воплощено в покрытии цветочного рынка «Pescia flower market», Италия [7].

В качестве примера подвесного покрытия с поперечной вантовой системой и центральным рядом несущих стоек можно взять вантовое покрытие железнодорожной станции в г. Nanjing (Jiangsu Province, Китай), рис. 12.

Подвесное покрытие над олимпийским стадионом в Скво-Вэлли (США) вмещает 8000 зрителей. Его размеры в плане – 94,82 × 70,80 м. Подвесное покрытие представляет собой восемь пар наклонных коробчатых балок переменного сечения, поддерживаемых вантами. Ванты опираются на 2 ряда стоек, установленных через 10,11 м. По балкам уложены прогоны, а по ним коробчатого сечения плиты длиной 3,8 м. Несущие ванты – тросы имеют диаметр 57 мм [10].

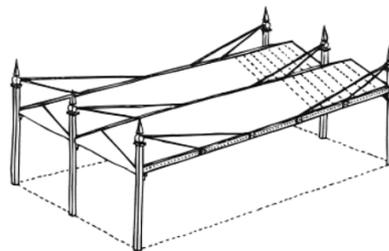


Рис. 15. Проект Ч. Макинтоша для Зеленого театра, 1853 г.

В 1853 г. Чарльз Макинтош (Charles MacIntosh) в своей работе «Книга сада» (“Book of the Garden”) впервые предложил конструкцию подвесного покрытия с продольной вантовой системой для Зеленого театра (Green House). Здесь каждая балка жесткости поддерживается четырьмя вантами, которые предусматривалось крепить к вертикальным стойкам (рис. 15). Однако для стоек (мачт) не предусматривались оттяжки с анкерами, и поэтому проект не был реализован [4].

Висячее покрытие над зданием бумажной фабрики в г. Мантуе, Италия, построено в 1963 г. Оно содержит шесть продольных балок жесткости пролетом 163 м с симметричными консолями по 43 м. Покрытие подвешено при помощи четырех вант к двум железобетонным пилонам высотой 45 м. Со стороны здания напоминает висячий мост [10].

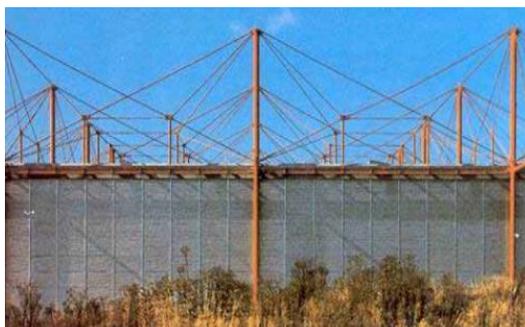


Рис. 16. Fleetguard factory Quimper, Франция

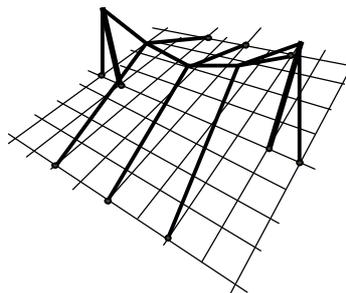


Рис. 17. Модель устойчивой вантовой структуры

Наличие такого вантового сооружения, как покрытие фабрики (Fleetguard factory Quimper) во Франции (рис. 16) и предложенная модель устойчивой вантовой структуры (рис. 17) [11] дает возможность ввести еще один вид (четвертый) вантовых покрытий в рассматриваемом классе – подвесное покрытие с поперечно-продольной вантовой системой. Покрытие фабрики во Франции (арх. Richard Roger, инж. Ove Arup, рис. 16) состоит из 25 модулей площадью 18 м². Каждый модуль покрытия содержит балки жесткости в двух направлениях и за углы подвешивается с помощью вант к стойкам.

Висячие вантово-арочные (арочно-вантовые) покрытия

Совершенно новые возможности висячих вантовых структур открыли знаменитые архитекторы Норман Фостер (рис. 18) и Сантьяго Калатрава (рис. 19).



Рис. 18. Стадион «Уэмбли», висячее вантовое покрытие, год постройки – 2006г., Лондон



Рис. 19. Стадион «Спирос Луис», висячее вантовое покрытие, год постройки – 2004 г., Афины

Их сооружения представляют собой отдельную группу висячих покрытий – *пилоновые арочно-вантовые покрытия*. Так называют висячую систему, которая поддерживается вантами, подвешенными к системе пилонов – арок. При этом

как пилоны, так и ванты, поддерживающие покрытие, расположены выше него, т. е. на ванты не укладываются ограждающие элементы покрытия.

Стадион «Уэмбли» (Wembley Stadium) – самая длинная однопролетная арочно-вантовая структура в мире. Арка держит край северной секции крыши стадиона. Стадион можно полностью открыть за 15 мин, убирая подвижные панели в южную неподвижную секцию крыши.



Рис. 20. Стадион в г. Дурбан (Южная Африка, построенный к чемпионату мира по футболу 2010 года)

Визитной карточкой г. Дурбан (Южная Африка) стал стадион Durban's Moses Mabhida Stadium, построенный к чемпионату мира по футболу 2010 года (рис. 20). Ведущий архитектор – Герхард Ле Ру (Gerhard le Roux). Тентовое укрытие для зрителей подвешивается к единственной арке – пилону при помощи вант, организованных в сетчатую структуру [12].

Очень важна проблема защиты вант от коррозии. В качестве защитных средств применяют цинкование, окраску, покрытие пластмассой.

Консольно-вантовые системы

Консольно-вантовые системы представляют собой балки жесткости, поддерживаемые за один конец вантами, а другим концом опирающиеся непосредственно на сооружение. Простейшим примером такой одноконсольной системы является вантовый консольный козырек (рис. 21), который крепится к несущей стене с помощью специальных растяжек – вант (тяги, растяжки). Тяги могут быть выполнены из прутков, труб или тросов. Козырьки консольно-вантового типа по желанию архитектора могут иметь большую зону покрытия, так как второй конец конструкции поддерживается вантами, через которую нагрузка от козырька передается опять же



Рис. 21. Козырек консольно-вантового типа длиной 6,5 м (стекло закаленное, нержавеющей сталь, ТМ-Ресурс: Архитектурные конструкции, Екатеринбург)



Рис. 22. Ангар в аэропорту Франкфурта-на-Майне

на основное сооружение. Прогибы концов консоли консольно-вантовых структур могут достигать больших величин порядка нескольких десятков сантиметров, поэтому их вылеты обычно принимают не более 40-50 м. Ярким представителем двухконсольного подвесного покрытия является ангар в аэропорту Франкфурта-на-Майне с вылетом одной консоли 55,65 м (рис. 22). Покрытие состоит из 16 оболочек с каждой стороны. Ширина одной железобетонной монолитной оболочки – 10,7 м, толщина – 8 см. По периметру оболочек расположены бортовые элементы сечением 22×30 см. Одна сторона оболочки шарнирно опирается на каркас центрального здания, а ее консольная часть поддерживается шестью канатами, каждый из которых состоит из 40 проволок овального сечения. Проволоки находятся в стальной трубке толщиной 0,35 мм. Для защиты вант от коррозии трубка наполнена цементным раствором. Допустимый прогиб конца консоли – 90 см.

Хорошо известно консольно-вантовое покрытие здания галереи для приема пассажиров в аэропорту Шереметьево (рис. 23). Покрытие галереи, круглое в плане, состоит из стальных балок, каждая из которых поддерживается четырьмя вантами диаметром 59 мм. Ванты крепятся к металлическому кольцу центральной



Рис. 23. Галерея для приема пассажиров в аэропорту Шереметьево

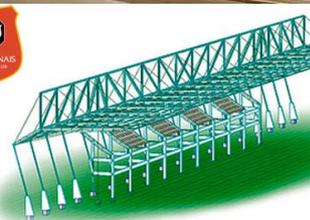


Рис. 24. Висячее вантовое покрытие ФК «Ренн», г. Ренн, Франция

ной зоны здания.

Висячее вантовое покрытие футбольного клуба «Ренн» (football club “Rennais”), построенное в 2004 году в г. Ренн, Франция, также можно причислить к консольно-вантовым системам (рис. 24). Здесь имеется опорная структура (трибуны), жесткие консоли в виде ломаных балок, которые за один конец поддерживаются вантами, а другими концами опираются на трибуну или зафиксированы к земле при помощи оттяжек и анкеров. Расчет конструкций выполнен компанией Egis.

Покрытие газовой станции в Милане, Италия (Gas station in Milano) также выполнено в виде консоли, поддерживаемой за один конец вантами, а другим концом, опирающимся на высокие стойки, расчаленными оттяжками [7] в поперечном направлении.

Вантовые конструкции башенного типа в форме однополостного гиперболоида, с вантами, совпадающими с прямыми образующими однополостного гиперболоида

Есть еще одна разновидность вантовых структур, где гибкие ванты воспринимают только растягивающие усилия. Но эти структуры выделены в отдельную группу, т.к. здесь ванты в отличие от висячих структур обеспечивают устойчивость сооружению, а главной несущей конструкцией является центральный пилон (столб).



Рис. 25. Сиднейская телебашня (Австралия). 2005. <http://www.enci.ru/>



Рис. 26. Гиперболоидная башня в порту Кобе

Иногда уникальным сооружениям башенного типа форма однополостного гиперboloида вращения придается с помощью вант или тросов. Сооружение состоит из центрального цилиндрического пилонa, на котором установлены кольцевые площадки, внешний контур которых совпадает с параллелями однополостного гиперboloида, а тросы располагаются в направлении прямолинейных образующих гиперboloида. К таким сооружениям можно отнести Сиднейскую телебашню (Австралия, рис. 25) и 108-метровую башню в порту Кобе (Япония, рис. 26), построенную по проекту компании Nikken Sekkei в 1963 году. Сравнивая эти две башни, при формoобразовании которых использовалась одна и та же форма однополостного гиперboloида вращения, можно заметить, что они совершенно не похожи друг на друга. В обоих случаях чувствуется работа талантливого архитектора.



Рис. 27. Тросовая башня градирни с центральным пилоном (Германия)

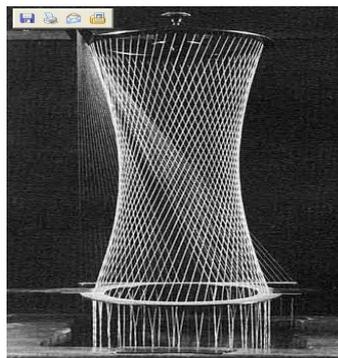


Рис. 28. Диагональная схема установки тросов в тросовой градирне

Еще одной областью применения вантов являются вантовые градирни. В ФРГ разработаны проекты вантовых конструкций вытяжных башен градирен (рис. 27), обладающих более высокими технико-экономическими показателями, чем традиционные железобетонные конструкции.

Основными конструктивными элементами вантовой градирни являются преднапряженные ванты из стальных канатов, размещенные в диагональном направлении (рис. 28). Вантовая градирня высотой 146 м с алюминиевой обшивкой построена в г. Шмехаузен (ФРГ) и имеет очертание образующей по гиперболе. Для придания башне этой традиционной формы потребовалась большая точность разметки вант и напесовка на них специальных крепежных деталей, но даже в этом случае из-за неравномерной вытяжки вант возможны отклонения от проектной формы, а, следовательно, и неравномерные усилия в вантах. Строго говоря, вытяжные башни градирен этого типа следует называть тросовыми башнями, т.к. здесь не используются открытые тросы.



Рис. 29. Вантовая башня в парке г. Штутгарта, Германия

Не менее интересна вантовая башня, подвешенная на центральном пилоне, возведенная в 2000 г. в парке Штутгарта (Killesberg tower, Killesbergpark) высотой 40 м (рис. 29). Башня в форме однополостного гиперboloида вращения запроектирована Ю. Шлайхом (Jörg Schlaich). На вершину башни можно подняться по винтообразной лестнице одинакового ската, прикрепленной к

промежуточным площадкам, которые, в свою очередь, прикреплены к центральному пилону.

Тросовые оттяжки высоких мачт

Все материалы для оттяжек выполняются из особо прочной стали, опорные части конструкции, как правило, из железа и бетона. Здесь ярким примером мо-



Рис. 30. Мачта переизлучателя с вантовыми растяжками, http://vk.com/wall-13502584_2023



Рис. 31. Мачта с вантовыми оттяжками на покрытии здания

жет быть мачтовый переизлучатель во Владимирской области (рис. 30). Высота всей мачты – 330 м, вантовые растяжки крепятся к мачте через каждые 70 м.

Высокие мачты с тросовыми оттяжками могут устанавливаться не только на земле, но и на покрытии сооружений (рис. 31).

Висячие мосты

Висячие мосты разделяются на две основные группы (рис. 32). В мостах первой группы элемент ABC изготавливается из отдельных звеньев, объединенных в цепь (рис. 32, а). Цепь ABC вместе с оттяжками AD и EC и пилонами Aa ,

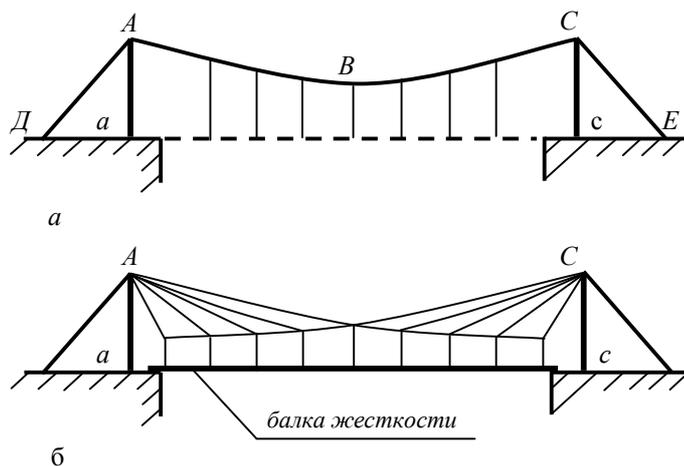


Рис. 32

Cc воспринимает всю нагрузку. В настоящее время элемент ABC делают из тросов, но название мостов этой группы – «цепной мост» – оставили прежним (рис. 33). Цепные мосты строили в Индии и Китае уже в I веке. Мосты второй группы (рис. 32, б) называют вантовыми мостами. Здесь нагрузку воспринимают раскосы и пояса. Вантовые висячие мосты разделяются на 3 группы: статически определимые вантовые фермы, статически неопределимые предварительно на-

прягаемые фермы без балок жесткости и статически неопределимые вантовые фермы с балками жесткости (рис. 32, б). Более подробную информацию о классификации висячих мостов, их конструктивных особенностях и методах расчета можно получить из книг [13, 14], а в данном разделе только укажем на существование таких вантовых структур, как «висячие мосты».



Рис. 33. Цепной мост Siduhe River Bridge, 2009 год. Длина главного пролета – 900 м, высота перекрываемого пространства - 496 м до дна ущелья.



Рис. 34. Вантовый висячий мост, соединяющий г. Владивосток и о. Русский

Сегодня самым высоким в мире подвесным мостом является мост, соединяющий г. Владивосток с островом Русский: вершина его главных опор - 327 метров. Здесь и самый длинный центральный пролет - 1104 метра. А общая протяженность натяжных тросов - вант составила почти 55 км (рис. 34).

Заключение

Висячие вантовые покрытия вдохновляют инженеров на протяжении многих лет. Однако вантовые системы все еще довольно новый тип конструкций

покрытий. Сегодня вантовые конструкции признают инновационными конструктивными решениями, с помощью которых можно создавать впечатляющие геометрические формы и вместе с тем эффективно перекрывать большие пролеты сооружений. Интерес к вантовым покрытиям особенно усилился в связи с решением ФИФА о проведении в Российской Федерации чемпионата мира по футболу в 2018 году – ведь современные покрытия спортивных арен возводятся в основном с применением висячих вантовых и тросовых конструкций. Кроме того, в помощь архитекторам создано несколько компьютерных программ, облегчающих проектирование вантовых структур [15].

Естественно, не все вантовые структуры, созданные архитекторами и инженерами, можно причислить к тому или иному типу вантовых структур, пред-

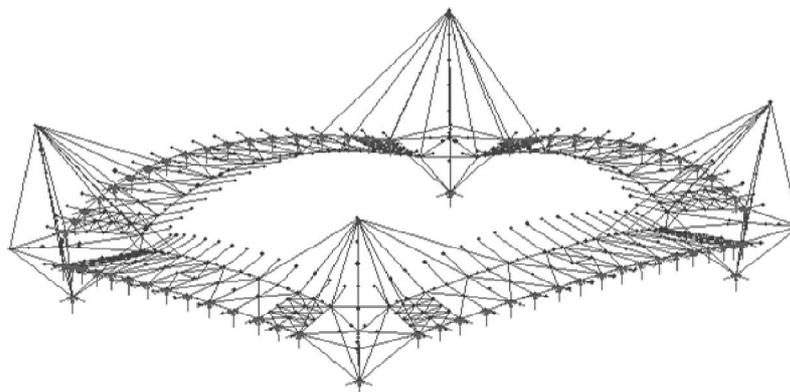


Рис. 35. Модель покрытия стадиона Chunu/Jeonju Stadium, Южная Корея [http://www.lusas.com]

ставленных в предложенной классификации. Например, покрытие над железнодорожными платформами в г. Тилбурге, Нидерланды, описанное в работе [10], с размером в плане $46,2 \times 147$ м состоит из 12 гипаров, часть углов которых опираются на железобетонные опоры, а другая часть углов поддерживается вантами. Или взять, например, покрытие стадиона (Chunu/Jeonju Stadium) в Южной Корее размером 260×160 м. Стадион был построен к чемпионату мира по футболу 2002 года. Покрытие подвешено к четырем мачтам высотой 63 м, установленным в углах (рис. 35) стадиона. Причем 4 ванта поддерживают свободный край длинной секции стадиона, а 3 – свободный край короткой секции. Еще 4 ванта являются стабилизирующими для каждой мачты. Использовались ванта диаметром 65 и 95 мм. С определенными оговорками эту структуру можно отнести к консольно-вантовым системам или ввести еще один, десятый, тип вантовой структуры «Подвесные вантовые покрытия с четырьмя стойками, расположенными в углах прямоугольного плана». Тогда к этому же типу можно отнести вантовую систему над трибунами стадиона, предложенную В.В. Ханджи и И.В. Лисицыным (рис. 36) [1].

Укажем также на существование арочно-вантовых комбинированных конструкций, которые практически не рассматривались в настоящей статье и не включены в предложенную классификацию. Часть из них представлены на рис. 1, см. предпоследнюю строку. В отличие от висячих вантово-арочных покрытий, арочно-вантовые комбинированные конструкции не являются висячими. Интересные примеры применения комбинированных арочно-вантовых конструкций в РФ приведены в статье Д.Б. Киселева [16].

Как показывают приведенные примеры, есть хорошие перспективы у всех типов вантовых конструкций, включенных в приведенную классификацию.

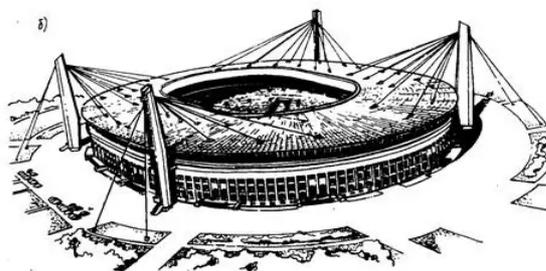


Рис. 36. Вантовая система с 4-мя пилонами над трибунами стадиона

Л и т е р а т у р а

1. *Голосов В.Н., Ермолов В.В., Лебедева Н.В. и др.* Инженерные конструкции: Уч. для вузов по спец. «Архитектура». – М.: «Высшая школа», 1991. – 408 с.
2. *Кривошапко С.Н.* Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений// Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 7 (34). – С. 51-70.
3. *Федулов В.К., Суладзе М.Д., Артемова Л.Ю.* Вантовые покрытия: Учебное пособие. – М.: МАДИ, 2014. – 48 с.
4. *Harris James B., Pui-K Li Kevin.* Masted Structures in Architecture. – Taylor & Francis, 1996. – 160 p.
5. *Скопенко В.А.* Тентовая архитектура: вчера, сегодня, завтра// Академический вестник УралНИИПроект РААСН. – 2010. - № 1. – С. 30-36.
6. *Кривошапко С.Н.* Тентовая архитектура// Строительство и реконструкция. – 2015. – № 3(59). – С. 100-109.
7. *Zordan Luigi, Morganti Renato.* Large roofs, large spaces. Suspended cable roofing in Italy 1948-1970// Proc. of the First Int. Congress on Construction History, Madrid, 20th-24th January 2003, pp. 2139-2148.
8. *Vintage British high tech// CMU Architecture.* – 2013. – Jule 09. [<https://cmuarch2013.wordpress.com/2009/07/09/vintage-british-high-tech/>].
9. *Kloiber L.A., Eckmann D.E., Meyer Th.R., Hautzinger St.J.* Design considerations in cable-stayed roof structures// North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction. – March 2004. – 7 p.

10. Косенко И.С. Висячие конструкции покрытий. – М.: Стройиздат, 1966. – 88 с.
11. Changhua Wei and Yi Sun. Philosophy of structure: How Tensile Structure Works: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch374/winter2002/psysisun/howtensileworks.htm>
12. Hennig Wanda. The man who built Durban's Moses Mabhida Stadium, 2012, <http://www.wandahennig.com/2012/10/the-man-who-built-durbans-moses-mabhida-stadium/>
13. Качурин В.К., Брагин А.В., Ерунов Б.Г. Проектирование висячих и вантовых мостов. – Изд-во «Транспорт», 1971. – 280 с.
14. Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. – Л.: Госстройиздат, 1962. – 224 с.
15. Сыч С. Проектирование вантовых конструкций в Autodesk Robot Structural Analysis Professional// Cadmaster. – 2012. – № 6. – С. 84-86.
16. Киселев Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования// Современное промышленное и гражданское строительство. – 2006. – Том. 2. - № 1. – С. 17-27.

References

1. Golosov, V.N., Ermolov, V.V., Lebedeva, N.V. et al (1991). *Injenernie Konstruktzii: Uch. dlya vuzov po spetz. "Arhitektura"*, Moscow: "Vysshaya Shkola", 408 p.
2. Krivoshapko, S.N. (2015). Suspension cable structures and roofs of erections, *Construction of Unique Buildings and Structures*, № 7 (34), p. 51-70.
3. Fedulov, V.K., Suladze, M.D., Artemova, L.Yu. (2014). *Vantovie Pokrytiya: Uch. Posobie*, Moscow: MADI, 48 p.
4. Harris J.B., Pui-K Li Kevin (1996). *Masted Structures in Architecture*, Taylor & Francis, 160 p.
5. Skopenko, V.A. (2010). Tent architecture: yesterday, today, tomorrow, *Akademicheskii Vestnik UralNIIProekt RAASN*, № 1, p. 30-36.
6. Krivoshapko, S.N. (2015). Tent architecture, *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya*, № 3(59), p.100-109.
7. Zordan Luigi, Morganti Renato. Large roofs, large spaces. Suspended cable roofing in Italy 1948-1970, *Proc. of the First Int. Congress on Construction History*, Madrid, 20th-24th January 2003, pp. 2139-2148.
8. Vintage British high tech// CMU Architecture. – 2013. – June 09. [<https://cmuarch2013.wordpress.com/2009/07/09/vintage-british-high-tech/>].
9. Kloiber, L.A., Eckmann, D.E., Meyer, Th.R., Hautzinger, St.J. (2004). Design considerations in cable-stayed roof structures, *North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction*, March 2004, 7 p.
10. Kosenko, I.S. (1966). *Visyachie Konstruktsii Pokrytiy*, Moscow: Stroyizdat, 88 p.
11. Changhua Wei and Yi Sun. Philosophy of structure: How Tensile Structure Works: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch374/winter2002/psysisun/howtensileworks.htm>
12. Hennig Wanda. The man who built Durban's Moses Mabhida Stadium, 2012, <http://www.wandahennig.com/2012/10/the-man-who-built-durbans-moses-mabhida-stadium/>
13. Kachurin, V.K., Bragin, A.V., Erunov, B.G. (1971). *Proektirovanie Visyachih i Vantovyh Mostov*, Izd-vo "Transport", 280 p.
14. Kachurin, V.K. (1962). *Teoriya Visyachih System, Sticheskiy Raschet*, L.: Gosstroyizdat, 224 p.
15. Sych, S. (2012). Design of cable-stayed structures in Autodesk Robot Structural Analysis Professional, *Cadmaster*, № 6, p. 84-86.
16. Kiselev, D.B. (2006). Combined (hybrid) arch-cable structures. Numeric and experimental researches, *Modern Industrial and Civil Construction*, Vol. 2, No 1, p. 17-27.

CABLE-STAYED STRUCTURES

S.N. Krivoshapko

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Cable-stayed structures are simple in assembling, light in weight, safe in maintenance, and sometimes possess the architectural expressiveness. The well-known structures and buildings of all types which had practical importance and novelty, were marked by the rewards of professional association or were passed into the top lists of journals are presented in the paper. The author offered his own classification of cable-stayed structures containing nine types of considered structures.

KEY WORDS: suspended structures, cable-stayed structure, suspension cable-stayed structure, suspended cable roofing, stay, pylon, suspended bridge.

МЕТОД РАСЧЕТА ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИЗГИБЕ

П.К. КУЗЬМИН, инженер

ООО «Промтехэкспертиза», e-mail: KuzminPK@mail.ru

В статье изложен новый метод расчета ширины раскрытия трещин в нормальных сечениях железобетонных конструкций при изгибе по деформационной модели. Приводятся данные экспериментального обоснования достоверности расчетных формул.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трещиностойкость, трещина, ширина трещины, деформационная модель, железобетонная конструкция.

Существующие методы расчета

Анализ существующих методик расчета и расчетных формул ширины раскрытия трещин выполнен в монографии В.Н. Бондаренко и В.И. Колчунова [1]. Все подходы к решению задачи и результаты, полученные авторами, разделены на 4 группы.

Первую группу составляет большинство работ, использующих исходные условия, изложенные в теории В.И. Мурашова, по которым ширина раскрытия трещин определяется как разность удлинения арматуры на участке между трещинами минус деформация бетона. К этой группе относятся работы Я.Н. Немировского, Г.А. Молодченко, Томаса, Баха. При допущении прямоугольной эпюры напряжений бетона между трещинами формула ширины раскрытия трещины имеет вид:

$$a_{crc} = \frac{\sigma_s}{E_s} l_{crc} \left(1 - \omega_1 \frac{R_{bt}}{\sigma_s} \frac{1 + \alpha_s \mu_s}{\mu_s} \right), \quad (1)$$

ω_1 - эпюра полноты растягивающих напряжений, изменяется в пределах от 0,5 до 0,7.

Вторую группу составляют эмпирические формулы, построенные по результатам экспериментальных исследований. Здесь известны работы Н.И. Мулина и Ю.П. Гуци, О.Я. Берга, Ватштейна.

Исследования, выполненные в НИИЖБе, показали, что основными параметрами, влияющими на ширину раскрытия трещины, являются напряжения в растянутой арматуре, ее диаметр, процент армирования, толщина защитного слоя. Принятая в нормах эмпирическая формула ширины раскрытия трещин имеет вид:

$$a_{crc} = \delta \varphi_e \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20 (5,5 - 100 \mu_s)^{\sqrt[5]{d}}, \quad (2)$$

где δ - коэффициент, учитывающий силовое воздействие; φ - коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки; η - коэффициент, учитывающий профиль рабочей арматуры. Недостатком эмпирических формул является ограничение области их применения только в случаях конструкций элементов, применительно к которым проведены исследования.

Представителями третьей группы являются работы О.Я. Берга.

Расчетная формула имеет вид:

$$a_{crc} = \frac{\sigma_s}{E_s} \psi_s \sqrt{R_r(\beta)}, \quad (3)$$

где β - это коэффициент, учитывающий степень сцепления арматуры с бетоном.

В качестве недостатка указывается «невозможность» одним коэффициентом β достоверно описать сложные процессы сцепления арматуры с бетоном.

К четвертой группе относятся исследования В.И. Колчунова, А.Н. Кузнецова, А.А. Оатул, Ш.А. Хакимова, в которых «раскрытие трещин рассматривается как накопление относительных смещений арматуры и бетона на участках между трещинами»:

$$a_{crc} = 2 \int_0^{0,5l_{crc}} \varepsilon_g(z) dz, \quad (4)$$

где ε_g относительное смещение бетона и арматуры. Общим недостатком формул перечисленных выше групп (за исключением эмпирических) является отсутствие экспериментального подтверждения точности решения в силу условности принятых гипотез.

Расчетная модель. Вывод формулы ширины раскрытия трещин.

За расчетное принимаем напряжение в арматуре, равное пределу упругости, обеспечивающее смыкание трещин, вызванных упругим последствием. Соответственно предельные деформации и напряжения в арматуре не должны превышать следующих величин:

$$\varepsilon_{0,015} = 150 \cdot 10^{-5}, \quad \sigma_a = \varepsilon_{0,015} E_a = 3000 \text{ кг/см}^2. \quad (5)$$

При расчете плит на трещиностойкость максимальная ширина раскрытия трещин в фибровом сечении на нижней поверхности определяется из условия достижения в арматуре предельных деформаций, равных условному физическому пределу упругости: $\varepsilon_{0,02} = 200 \cdot 10^{-5}, \quad \sigma_a = \varepsilon_{0,02} E_s = 4000 \text{ кг/см}^2$.

За основу метода расчета принята деформационная модель, согласно которой деформации по высоте нормального сечения распределяются по линейному закону относительно нейтральной оси, эпюра распределения напряжений сжатой зоны - линейно-упругая, в растянутой - линейно-пластическая; пластические деформации рассматриваются как непрерывный процесс образования и накопления микроразрывов сплошности структуры растворно-цементной матрицы бетона.

За расчетное принимается напряженно-деформированное состояние нормально-го сечения с трещиной, при котором продольные деформации на поверхности сжатой зоны не превышают предельных значений при осевом сжатии ($\varepsilon_{сж} = \varepsilon_{0,2}$), а в растянутой - предельной растяжимости бетона (ε_p) будучи связанными зависимостями:

$$\varepsilon_p = \mu \cdot \varepsilon_{сж}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{0,2}^I = 200 \cdot 10^{-5}$ отн. ед ; $\varepsilon_p = 22 \cdot 10^{-5}$ отн. ед ; $\mu = 0,11$ – коэффициент Пуассона. На рис. 2 представлена фотография распределения полос интерференции в слое оптически активного покрытия, нанесенного на поверхность железобетонной балки в зоне чистого изгиба.

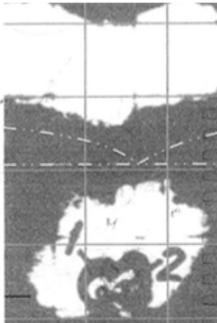


Рис. 2. Фотография полос интерференции

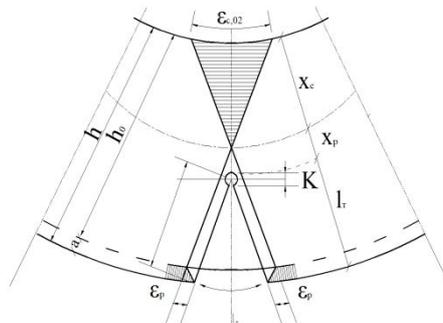


Рис. 3. Схема расчета ширины раскрытия трещины по деформационной модели

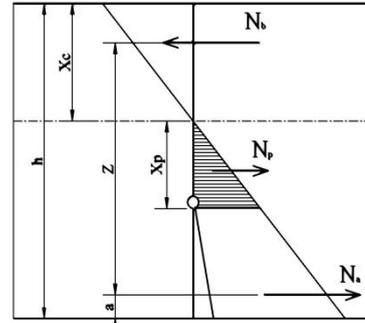


Рис. 4. Расчет прочности поперечного сечения с трещиной

В соответствии с рис. 2 величина концентратора деформаций в вершине трещины относительно к осевому растяжению принимается равной $K_p = 4$. Соответственно, предельная растяжимость бетона в вершине трещины равна:

$$\varepsilon_{p-k} = K_p \varepsilon_p^I = \varepsilon_{p0,04}. \quad (7)$$

Предельно допустимая ширина раскрытия трещины в случае чистого изгиба, если это не связано с эксплуатационными требованиями, определяется из условия достижения в арматуре, пересекающей трещину, деформаций, равных физическому

пределу текучести $\varepsilon_{0.02}$ за которым начинается процесс неконтролируемого раскрытия трещины, ее прорастания и разрушения сечения. Работой бетона на растяжение на участках между трещинами пренебрегают.

Вывод расчетной формулы

Следуя закону подобия эпюр относительных деформаций и относительной ширины раскрытия трещин (рис. 3, 4), получим формулу ширины раскрытия a_T в виде:

$$a_T = \frac{h_T \cdot \varepsilon_c \cdot l_T}{x_c} \tag{8}$$

Раскроем значения ее составляющих: x_c - высота сжатой зоны из условия равновесия напряженного состояния нормального сечения с трещиной,

$$x_c = 0,48\mu \cdot n \cdot h, \tag{9} \quad n = \frac{E_a}{E_b}; \mu = \frac{A_a}{A_b}, \tag{10}$$

x_p - высота растянутой зоны над трещиной из условия соотношения предельных деформаций сжатой и растянутой зоны:

$$x_p = 0,2x_c, \tag{11}$$

h_T - высота трещины: $h_T = x_c - x_p = h \left(1 - 1,2 \frac{x}{h}\right) = h \cdot K_T,$ (12)

$$k_T = 1 - 1,2\xi; \tag{13}$$

В формулу (11) входят k_T - коэффициент, характеризующий высоту сечения над трещиной: $\xi = x/h$ - относительная высота сжатой зоны:

$$\xi = \frac{x}{h_0} = R_a \cdot \frac{A_a}{R_b}. \tag{14}$$

После подстановки получим: $a_T = \frac{0,96 \varepsilon_c \cdot k_T \cdot l_T}{\mu \cdot n},$ (15)

l_T - расстояние между трещинами.

Расчет расстояния между трещинами не имеет точного решения в силу влияния случайных факторов, в том числе начальных напряжений, вызванных технологическими причинами.

Выбор и обоснование расчетной модели, объем и методика испытаний

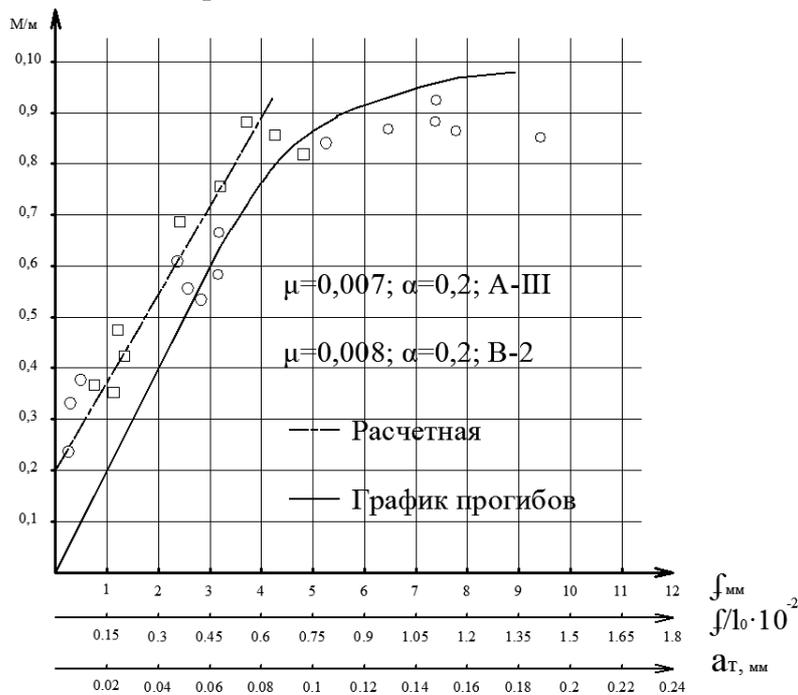


Рис. 5. Опытные и расчетные значения ширины раскрытия трещин

Исследования проводились на физических моделях в виде балочных плит размером $70 \times 15 \times 5$ см. Значение геометрических параметров относительных величин ширины и длины к высоте аналога и модели соответственно равны

$$b/h = 3, L/h = 12, \text{ размеры в плане } L/b = 4,6.$$

При выбранном геометрическом масштабе 1:3 размеры физической модели осредненно охватывают основной спектр номенклатуры выпускаемой промышленностью сборных железобетонных плит покрытий без предварительного напряжения.

Армирование осуществлено арматурой класса А-III и В-II, А-I, рекомендуемой нормами. Величина коэффициента армирования изменялась от 0,025 до 0,076 в соответствии с диапазоном изменения реального армирования плит. Учитывая статистическую природу распределения трещин на поверхности, значение l_T можно определять по формулам действующих норм. Опытные и расчетные значения ширины раскрытия трещин в зависимости от уровня напряжения приведены рис. 5.

Близкое совпадение опытных и расчетных результатов свидетельствует о достоверности предлагаемого метода расчета по формуле. При этом заметим, что опытные точки a_T образцов, армированных сталью В-II, расположились выше опытных точек, армированных «мягкой» сталью А-III.

Испытания выполнены в соответствии с программой научных исследований кафедры ПС ПГС инженерного факультета РУДН совместно с соискателями степени магистра наук (Ю.В. Середа, Е.С. Белобородова, О.В. Панин).

Л и т е р а т у р а

1. *Бондаренко В.М., Колчунов В.И.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 471 с.

2. *Майоров В.И., Кузьмин П.К.* От условной к точной модели расчета трещиностойкости железобетонных сечений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – №2. – С. 22-28.

References

1. *Bondarenko, V.M., Kolchunov, V.I.* (2004). *Calculated Models of Force Resistance of Reinforced Concrete*, Moscow: Izd-vo ASV, 471 p.

2. *Mayorov, B.I., Kuzmin, P.K.* (2011). From conventional to accurate model of analysis of crack resistance of reinforced concrete sections, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, № 2, p. 22-28.

THE METHOD OF ANALYSIS OF WIDTH OF THE CRACK OPENINGS IN FERRO-CONCRETE STRUCTURES UNDER BENDING

P.K. KUZMIN

LLC «Promtehekspertiza», Moscow, Russia

The article contains the new width calculating method of the cracks opening in normal sections of ferro-concrete structures in bending via deformation model. Experimental data of valid calculations are given.

KEY WORDS: crack resistance, crack, crack width, deformation model, reinforced concrete structure.



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ТОЧКИ КОНТАКТА ЗУБЬЕВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧЕ

В.А. РОМАНОВА, *доцент*,
В.М. МАТВЕЕВ, *канд. техн. наук, доцент*
Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

В статье рассматривается возможность визуализации в среде AutoCAD перемещения точек зацепления при вращении зубчатых колес.

Ключевые слова: визуализация, зубчатое колесо, зубчатая передача, линия зацепления.

Если в цилиндрической зубчатой передаче выполняется условие $\varepsilon_\alpha = \varphi_\alpha / \tau > 1$, где ε_α - коэффициент торцового перекрытия, φ_α - угол торцового перекрытия, τ - угловой шаг зубчатого колеса, то в такой передаче в зацеплении одновременно могут находиться несколько пар зубьев. В зубчатых передачах, составленных из эвольвентных зубчатых колёс, нарезанных инструментом со стандартными значениями параметров

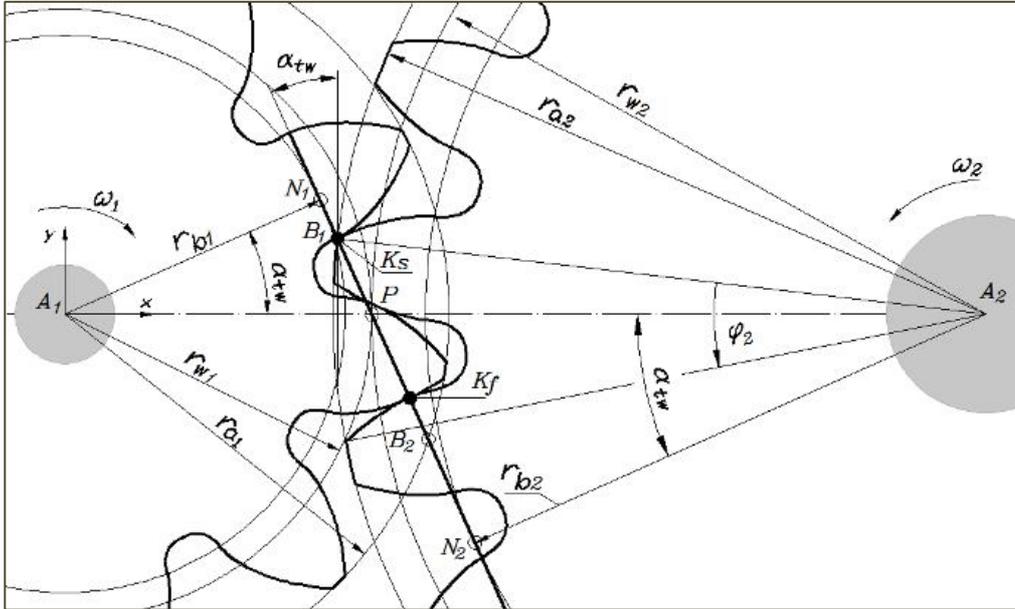


Рис.1. Начальное положение зубчатых колес

исходного производящего контура, чередуются однопарное и двухпарное зацепления.

Рис. 1 иллюстрирует момент входа в зацепление в точке B_1 второй пары зубьев, тогда как предыдущая пара еще не вышла из зацепления. Здесь обозначено: K_S – точка входа пары зубьев в зацепление; K_f – положение точки контакта взаимодействующей пары зубьев в момент входа в зацепление последующей пары.

Последующая пара зубьев входит в зацепление при повороте зубчатых колёс предыдущей пары на величину углового шага τ (рис. 2).

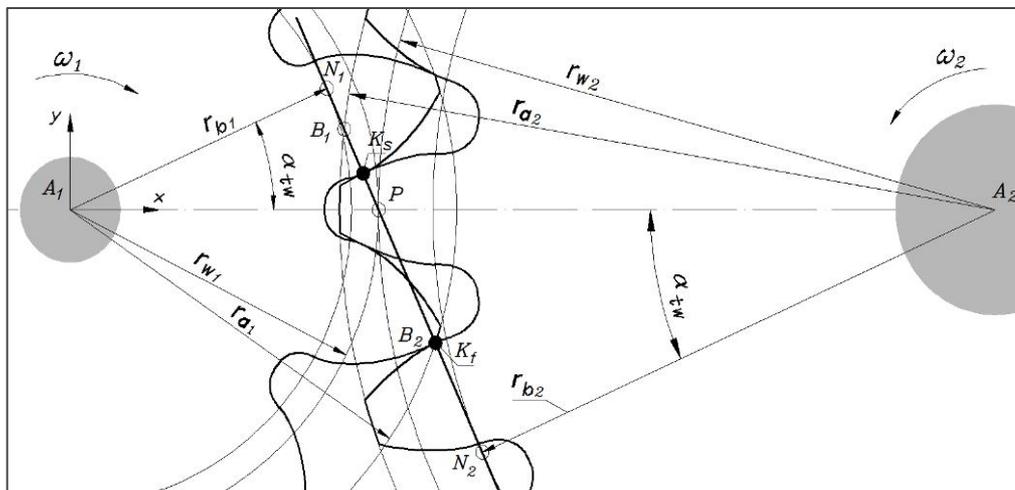


Рис. 2. Выход точки K_f из зацепления

Визуализация движения точек контакта при двухпарном зацеплении реализуется в системе AutoCAD программой «Зубчатое зацепление», разработанной на языке AutoLisp. Исходными данными для работы программы являются модуль зубчатой передачи m , числа зубьев зубчатых колёс z_1 и z_2 , а также результаты расчета геометрических параметров этих колёс.

В начальном положении колес $\varphi_2 = \tau_2$. Поэтому в программе предусмотрено движение точки зацепления K_f при $\tau_2 \leq \varphi_2 \leq \varphi_{\alpha 2}$, а точки K_s - при $\tau_2 \leq \varphi_2 \leq 2\tau_2$.

Точки зацепления движутся поступательно по линии зацепления, составляющей с осью A_1A_2 угол $\frac{\pi}{2} - \alpha_{tw}$. Координаты точек зацепления определяются в цикле с параметром φ_1 .

В начальном положении $K_sN_2 = B_1N_2$. Перемещение точки K_s при повороте колеса z_1 на угол $\Delta\varphi_1$ определяется из выражения

$$\Delta s = \Delta\varphi_1 \cdot r_{B_1},$$

а величина отрезка K_sN_2 на каждом шаге цикла равна:

$$K_sN_2 = K_sN_2 - \Delta s.$$

Отрезок PK_s определяется из выражения

$$PK_s = K_sN_2 - PN_2,$$

где

$$PN_2 = \sqrt{r_{w2}^2 - r_{b2}^2},$$

а координаты точки K_s - из выражений:

$$x = r_{w1} - PK_s \cdot \sin \alpha_{tw}, \quad y = PK_s \cdot \cos \alpha_{tw}.$$

Для точки K_f координаты определяются по формулам:

$$PK_f = K_fN_2 - PN_2, \quad x = r_{w1} - PK_f \cdot \sin \alpha_{tw}, \quad y = PK_s \cdot \cos \alpha_{tw}.$$

Координаты точек K_f и K_s вычисляются пользовательскими функциями Ptz и Ptz@. В конце цикла выполняется переименование точек.

Ниже приведен фрагмент программы «Зубчатое зацепление»:

```
(setq n (getint "\n Введите число зацеплений: _"))
(repeat n
(while (< fi2t (< fi2t fialfa2)
(setq fi2t (+ fi2t dfi2a))
(command "rotate" e1 "" A1 dfi1a)
(command "rotate" e2 "" A2 dfi2a)
(command "delay" 30)
(if (> KN2 B2N2)
(progn
(setq kf2 (ptz df1))
(command "move" Kf "" kf1 kf2); движение первой точки зацепления - Kf
(setq kf1 kf2)
))
(if (> KN2@ B2N2)
```

```
(progn
(setq ks2 (ptz@ dfi2a))
(command "move" Ks "" ks1 ks2); движение второй точки зацепления -Ks
(setq ks1 ks2)) )
(if (< KN2 B2N2) (command "erase" Kf "")(princ)); удаление точки Kf
(while (and (> fi2t fialfa2) (<= fi2t 2tau2))
(setq fi2t (+ fi2t dfi2a))
(command "rotate" e1 "" A1 dfi1a)
(command "rotate" e2 "" A2 dfi2a)
(command "delay" 30)
(if (> KN2@ B2N2)
(progn
(setq ks2 (ptz@ dfi2a))
(command "move" Ks "" ks1 ks2); на линии зацепления только точка Ks
(setq ks1 ks2)
)))
(setq fi2t (- fi2t tau2))
(setq Kf Ks kf1 ks1 KN2 KN2@); переименование точки Ks в Kf
(setq KN2@ B1N2 Kks1 B1)
(command "donut" 0.0 2.0 B1 "")
(setq Ks (entlast)); точка зацепления в B1 - Ks
(if (/= (rem k 2.0) 0.0)(command "change" Ks "" "p" "c" "4" "")
(command "change" Ks "" "p" "c" "6" ""))
(setq k (1+ k)))
```

Л и т е р а т у р а

1. *Левитский Н.И.* Теория механизмов и машин. – М.: «Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1990. - С. 590.
2. *Романова В.А.* Особенности изображения процесса образования поверхностей в системе САПР AutoCAD// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2012. – №4. – С. 3-5.

References

1. *Levitziy, N.I.* (199). *Teoriya Mehanizmov i Mashin*, Moscow: “Nauka, Glavnaya redaktziya fiz.-mat. literatury”, 590 p.
2. *Romanova, V.A.* (2012). Features of the image of process of formation of surfaces in AutoCAD system, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, №4, pp. 3-5.

VISUALIZATION OF THE MOVEMENT OF A CONTACT POINT IN CYLINDER COG-TRANSMISSION

V.A. Romanova, V.M. Matveev
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

The article considers the possibility to visualize in the AutoCAD system the process of moving contact points during rotation of cog-wheels by creating mini-film, which can be used for students and teachers.

KEY WORDS: visualization, cog-wheel, cog-transmission, catch line.

Численные методы расчета конструкций

АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ С ЛОКАЛЬНЫМ УГЛУБЛЕНИЕМ

С.Н. ЯКУПОВ, к.т.н., старший научный сотрудник,

Т.Р. НАСИБУЛЛИН, инженер - исследователь

ИММ КазНЦ РАН, Казань

Для определения концентрации напряжений в тонкостенных элементах конструкций с локальными углублениями или дефектами необходимо использовать трехмерный подход. Для оболочек и панели выполнен анализ концентрации напряжений с локальным углублением. Исследовано влияния конечно элементного разбиения панели на получаемый результат, а также концентрация напряжений для панели от типа материала: модель Гука и модель Нео-Гука (резиноподобный материал).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сферическая и цилиндрическая оболочки, плоская панель, локальное углубление, трехмерные конечные элементы, напряженно-деформированное состояние, концентрация напряжений, модель Гука, модель Нео-Гука, сетка разбиения.

Введение. Для обеспечения безопасной работы конструкций и сооружений необходимо совершенствовать каждый этап его создания: проектирование и создание материала, проектирование архитектуры конструкции и сооружений с учетом условий эксплуатации, разработка технологии изготовления элементов и конструкций в целом и т.д. Важную роль в этой цепочке играет оценка уровня напряжений в элементах конструкций. Наряду с внутренними дефектами в структуре материала, наличие различных предусмотренных и непредусмотренных конструктивных углублений в элементах конструкций приводит к концентрации напряжений в этой области, что может стать причиной разрушения конструкций [1-6]. Теоретическим коэффициентом концентрации напряжений называется отношение наибольшего местного напряжения σ_{max} к номинальному напряжению σ [3]:

$$k = \sigma_{max} / \sigma$$

Любые физические объекты, конструкции и сооружения, окружающие нас, являются трехмерными телами, поэтому при строгой постановке их надо рассматривать в трехмерной постановке. Напряжения в окрестности отверстия не могут быть определены методами сопротивления материалов [3], т.е. по одномерной схеме расчета. Обычно для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) гладких тонкостенных элементов конструкций под действием равномерного давления используют оболочечные теории – задачу определения НДС сводят к двумерной схеме расчета. Задача определения напряжения в окрестности отверстия, возможно, впервые была решена методами теории упругости [7], в предположении, что длина и ширина пластины безгранично велики, а отверстие имеет конечный диаметр. Вопросы концентрации напряжений в однородном листе с центрально расположенным круговым отверстием при одноосном растяжении плоскими конечными элементами рассмотрено в статье [8]. При наличии локальных утонений и углублений или несквозных дефектов в тонкостенных конструкциях (при наличии геометрических концентраторов напряжений [3]), а также в области локальных креплений и районе приложения сосредоточенных нагрузок (при наличии силовых концентраторов напряжений [3]) возникает необходимость обращения к трехмерному подходу.

Для анализа концентрации напряжений тонкостенных элементов конструкций в трехмерной постановке можно использовать известные программные

комплексы, например ANSYS, в которой имеются трехмерные элементы с квадратичной аппроксимацией искомым переменных.

Также для расчета тонкостенных конструкций сложной геометрии в трехмерной постановке можно использовать сплайновый вариант МКЭ [9-12]. В этих работах описывается подход моделирования напряженно-деформированного состояния тела трехмерными конечными элементами, базирующегося на идеях предварительной параметризации рассматриваемой области параметрами единичного куба и метода конечных элементов с аппроксимацией искомым переменных интерполяционными эрмитовыми кубическими сплайнами во всех трех направлениях. Сплайновый вариант МКЭ обеспечивает непрерывность полей перемещения и его первых производных в рассматриваемом пространстве исследуемого тела, что позволяет получать необходимые результаты при небольшом разбиении (количестве конечных элементов).

Представляет практический интерес влияния типа материала на концентрацию напряжений вблизи дефекта в элементах конструкций. Если в элементах конструкций из пластичных материалов в окрестности концентратора образуется локальная зона пластических деформаций и происходит некоторое перераспределение (выравнивание) местных напряжений, то несущая способность элементов конструкций из высокопрочных материалов резко снижается [3].

Представляет интерес и влияния концентраторов напряжений на несущую способность элементов конструкций при нелинейно упругом деформировании, например, из эластомеров. Для резиноподобных материалов на сегодняшний день существует около десяти потенциалов [13-21].

Трехмерными элементами определены напряженно-деформированные состояния упругих (модель Гука) сферических и цилиндрических оболочек с локальными утонениями [9-12], на результатах этих исследований выполнен анализ концентрации напряжений в дефектных областях. Определена также концентрация напряжений в плоской панели с локальным углублением для двух типов материала: по модели Гука и по модели Нео-Гука (резиноподобный материал).

Сферическая и цилиндрическая оболочки

Сферическая оболочка под действием внутреннего избыточного давления $P = 10$ МПа внутренним диаметром $D_{bn} = 200$ см толщиной $h = 1,5$ см с отверстиями в области полюсов диаметром $d = 12,56$ см и углублением в области экватора [11]. Модуль упругости $E = 210000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Оболочка разбита на 144 элемента: 2 элемента по толщине, 9 элементов по φ и 8 элементов по θ (всего 243 узлов). Разбиение по окружной координате: $t^2 = -\pi; -0,75\pi; -0,5\pi; -0,25\pi; -0,1\pi; 0,1\pi; 0,25\pi; 0,5\pi; 0,75\pi; \pi$. Разбиение по меридиональной координате $t^3 = -0,48\pi; -0,375\pi; -0,25\pi; -0,125\pi; 0; 0,125\pi; 0,25\pi; 0,375\pi; 0,48\pi$. Геометрические параметры углубления: $62,8$ см \times $78,5$ см с центром $\varphi = 0$ и $\theta = 0$; глубина: $0,5$ см; $0,75$ и 1 см.

Решение задачи проводилось сплайновым вариантом МКЭ. В табл. 1 приведены значения максимальных концентраций окружных напряжений $k^{\sigma^{22}} = \sigma_{def}^{22} / \sigma^{22}$ под утонённой областью при $t^2 = 0$; $t^3 = \pm 0,0312\pi$.

Таблица 1. Коэффициенты концентрации напряжений $k^{\sigma^{22}}$

| Глубина дефекта | | |
|--------------------|---------------------|---------------------|
| $t_{def} = 0,5$ см | $t_{def} = 0,75$ см | $t_{def} = 1,00$ см |
| 1,58 | 2,12 | 3,04 |

Для сферической оболочки максимальные напряжения возникают вблизи дефектной поверхности и смещены от экватора на $\pm 0,0312 \pi$. При этом с увеличением глубины дефекта в два раза концентрация напряжений возрастает почти в два раза. Отметим, что для плоской пластины с центральным сквозным отверстием концентрация напряжений равна 3.

Цилиндрическая оболочка под действием внутреннего избыточного давления $P = 10$ МПа наружным диаметром $D_n = 82$ см толщиной $h = 0,9$ см и углублением [12]. Модуль упругости $E = 210000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Оболочка разбита на 80 элементов: 1 элемент по толщине, 8 элементов по длине и 10 элементов по окружности. Разбиение по окружной координате: $t^2 = 0, 0,25\pi, 0,5\pi, 0,75\pi, 0,875\pi, \pi, 1,125\pi, 1,25\pi, 1,5\pi, 1,75\pi, 2\pi$. Разбиение по длине: $t^3 = 0, 20$ см, 40 см, 50 см, 60 см, 70 см, 80 см, 100 см, 120 см. Геометрические параметры углубления: диаметр 21,4 см; глубина: 0,18 см; 0,27 см и 0,36 см.

Решение задачи проводилось сплайновым вариантом МКЭ. В табл. 2 приведены значения максимальных концентраций окружных напряжений $k^{\sigma_{22}} = \sigma_{\text{def}}^{\sigma_{22}} / \sigma^{\sigma_{22}}$ в области утонения.

Таблица 2. Коэффициенты концентрации напряжений $k^{\sigma_{22}}$

| Глубина дефекта | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $t_{\text{def}} = 0,18$ см | $t_{\text{def}} = 0,27$ см | $t_{\text{def}} = 0,36$ см |
| 1,232 | 1,384 | 1,568 |

Для цилиндрической оболочки максимальные напряжения возникают под дефектом. При этом с увеличением глубины дефекта в два раза концентрация напряжений возрастает в 1,27 раза.

Можно отметить, что для рассмотренных объектов при глубине дефекта равной 1/3 коэффициент концентрации для сферической оболочки на 9,3% превышает коэффициент концентрации для цилиндрической оболочки.

Плоская панель: панель (рис.1) длиной $l = 20$ см, шириной $b = 10$ см, толщиной $h = 2$ см с центральным односторонним локальным углублением (дефектом) с параметрами – в плане 0,15см x 0,15 см; глубина: 0,025 см; 0,05 см; 0,075 см; 0,1 см. Вдоль продольной оси ox на торцы панели действует распределенная нагрузка $q = 200$ Н/см² (суммарная сила $P = 4000$ Н). В качестве материала рассмотрены два разных вида материала – модель Гука (Сталь): $\eta = 0,3$, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; модель Нео-Гука (резиноподобный материал): $\mu = 0,4225$ Н/мм²; $K = 5$ Н/мм².

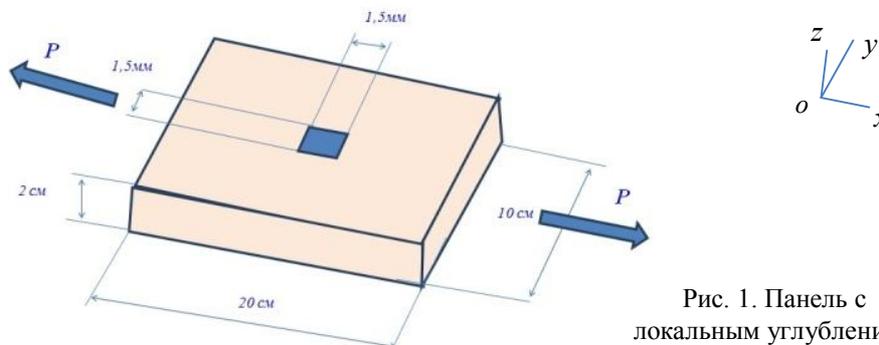


Рис. 1. Панель с локальным углублением

Расчетная схема. Решение задачи проводилось методом конечных элементов на базе учебного варианта пакета прикладных программ ANSYS. В силу симметрии относительно осей ox и oy была рассмотрена только четверть пане-

ли. На плоскости симметрии накладывались ограничения на передвижение относительно оси симметрии. При решении был использован конечный элемент SOLID186 (двадцати узловой конечный элемент). На рис.2 приведена четверть панели со схемой разбиения. На рис. 3 приведен график сходимости решения от степени разбиения. Исследование сходимости решения в зависимости от разбиения на конечные элементы выполнялось в следующем порядке: задавалось первоначальное разбиение и определялось максимальное напряжение в области дефекта. Затем увеличивалось разбиение и определялось максимальное напряжение для этого разбиения: плотность выбранной первоначальной сетки на каждом шаге увеличивалась на 10% на первых 10 шагах и затем увеличивалась на 50%, когда наблюдается сходимость решения – начиная с некоторого разбиения, не происходит изменения максимальных напряжений (рис. 3). Минимальная сетка – схема разбиения на конечные элементы, при котором наблюдается сходимость решения, используется дальнейших расчетах.

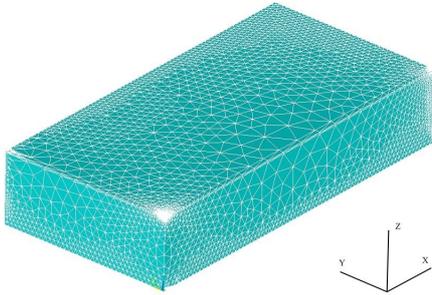


Рис. 2. Схема разбиения на КЭ

Численные результаты. Для анализа влияния глубины дефекта, а также материала панели на НДС панели был выполнен цикл расчетов. На рис. 4-11 представлены интенсивности напряжений σ_i в Н/м² для рассмотренной панели в зависимости от глубины и типа материала: слева по модели Нео-Гука (рис.4, 6, 8 и 10), а справа по модели Гука (рис.5, 7, 9 и 11).

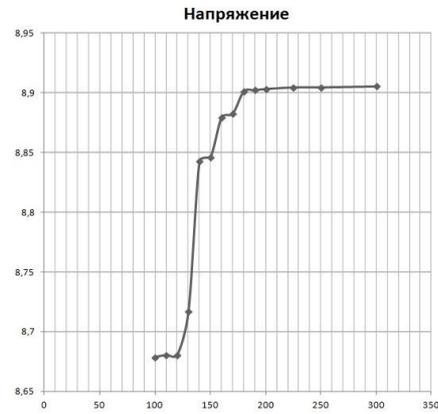


Рис. 3. Сходимость от разбиения на КЭ

В табл. 3 и 4 приведены концентрации напряжений и максимальные величины интенсивности напряжений для моделей Нео-Гука и Гука, соответственно, в зависимости от глубины дефекта.

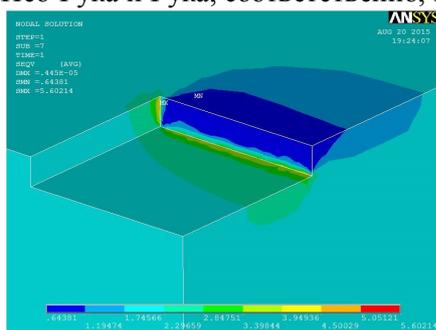


Рис. 4. σ_i (Н/м²), $h = 0,25$ мм, Нео-Гук

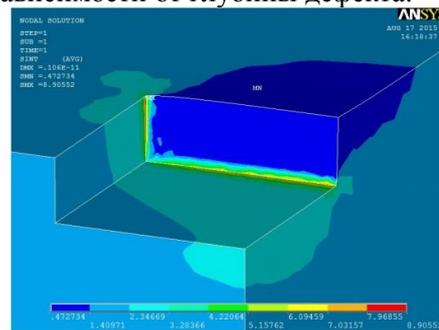


Рис. 5. σ_i (Н/м²), $h = 0,25$ мм, Гук

Таблица 3. Коэффициенты концентрации напряжений (модель Нео-Гука)

| | Глубина дефекта | | | |
|----------------------------------|-----------------|--------------|---------------|------------|
| | $h = 0,25$ мм | $h = 0,5$ мм | $h = 0,75$ мм | $h = 1$ мм |
| $k_{\sigma}^{11} = k_{\sigma}^x$ | 2,20 | 2,92 | 3,17 | 3,21 |
| Max σ , МПа | 5,602 | 5,842 | 6,342 | 6,419 |

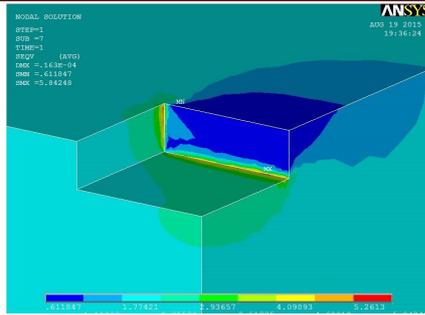


Рис. 6. σ_i (Н/м²), $h = 0,5$ мм, Нео-Гук

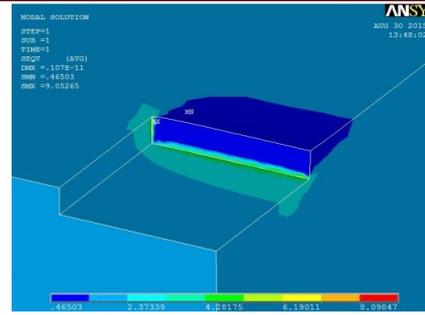


Рис. 7. σ_i (Н/м²), $h = 0,5$ мм, Гук

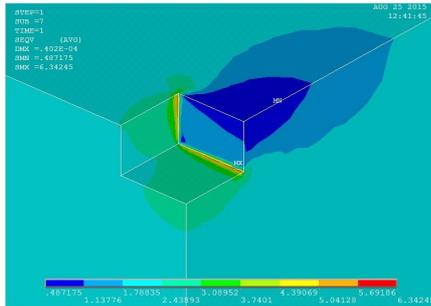


Рис. 8. σ_i (Н/м²), $h = 0,75$ мм, Нео-Гук

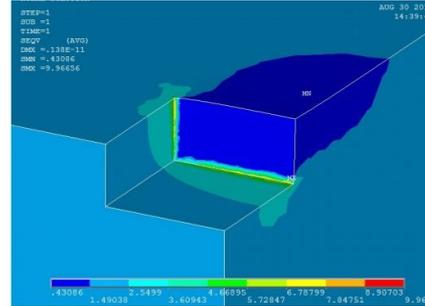


Рис. 9. σ_i (Н/м²), $h = 0,75$ мм, Гук

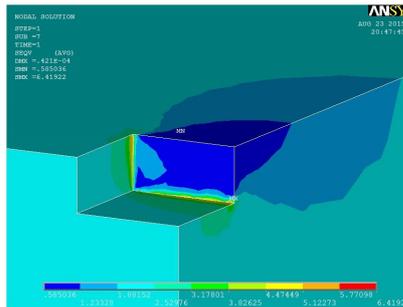


Рис. 10 – σ_i (Н/м²), $h = 1,0$ мм, Нео-Гук

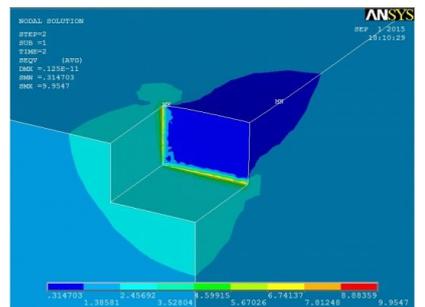


Рис. 11 – σ_i (Н/м²), $h = 1,0$ мм, Гук

Таблица 4. Коэффициенты концентрации напряжений (модель Гука)

| | Глубина дефекта | | | |
|----------------------------------|-----------------|--------------|---------------|------------|
| | $h = 0,25$ мм | $h = 0,5$ мм | $h = 0,75$ мм | $h = 1$ мм |
| $k_{\sigma}^{11} = k_{\sigma}^x$ | 4,45 | 4,50 | 5,00 | 5,00 |
| Max σ , МПа | 8,906 | 9,053 | 9,967 | 9,955 |

Выводы:

1. В области углублений возникают концентрации напряжений.
2. С увеличением глубины дефекта величина концентрации напряжений возрастает.
3. В сферических оболочках концентрация напряжений больше концентрации напряжений в цилиндрической оболочке.
4. В плоских панелях с локальным углублением концентрация напряжений выше, чем для панелей со сквозным дефектом – эффект трехмерности.
5. Начиная с некоторой сетки разбиения результаты не уточняются.
6. Концентрации напряжений σ_i в панели по модели Гука в 1,55 - 1,59 раз превышает концентрации напряжений в панели по модели Нео-Гука.

Л и т е р а т у р а

1. *Neuber H.* Theory of Notch Stress. – Ann Arbor, Mich.: J.W. Edwards, 1946.
2. *Grover H.J., Gordon S.A. and Jackson L.R.* Fatigue of metals structures. – Thames and Hudson. – 1956.
3. *Пономарев С.Д., Бидерман В.Л. и др.* Расчёты на прочность в машиностроении. Т.3. – М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1959. – 1119 с.
4. *Peterson R.E.* Stress Concentration Factors. – New York: J. Wiley & Sans, 1974.
5. *Collins J.A.* Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis, Prediction, Prevention. – The Ohio State University. New York: J. Wiley & Sans, 1981. – 624 с.
6. *Якупов Н.М.* Механика: проблема - идея - практика. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2010. – 161 с.
7. *Kirsch G.* Die Theorie der Elasticitat und die Bedurfnisse der Festigkeitlehre. – «VDI Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure». Bd. 32, 1898.
8. *Segal A., Klosner J.M.* Stress concentration in an elastomeric sheet subject to large deformations. – PIBAL Rep. 70-11. Polytechnic Inst. of Brooklyn, March. 1970. – 11 p.
9. *Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Киямов И.Х.* Моделирование элементов конструкций сложной геометрии трехмерными конечными элементами // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2011. – №1. – С.145-154.
10. *Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Киямов Х.Г., Кантюков Р.Р.* Моделирование напряженно - деформированного состояния цилиндрического тела с локальным углублением трехмерными конечными элементами // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – №2. – С.53-60.
11. *Якупов С.Н., Киямов И.Х.* Analysis of the mode of deformation of spherical covers three-dimensional elements // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2014. – No 2. – P.76-80.
12. *Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Киямов Х.Г., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р.* Концентрация напряжений в трубе с протяженным углублением // Газовая промышленность. – 2013. – №7. – С.28-30.
13. *Трелоар Л.Р.Г.* Физика упругости каучука. – М.: Изд-во «Иностранная литература», 1953. – 336с.
14. Расчёты на прочность в машиностроении. Т.2. – Изд-во «Машгиз», 1958. –944с.
15. *Green A.E., Zerna W.* Theoretical elasticity. –Oxford University Press, Oxford, 1960.
16. *Klosner J.M., Segal A.* Mechanical characterization of a natural rubber. – PIBAL Rep. 69-42. Polytechnic Inst. of Brooklyn, N.Y. 1969. – 42 p.
17. *Oden J.T.* Finite elements of nonlinear continua. – McGraw-Hill BOOK COMPANY. 1972 (Дж. Оден. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Изд-во «Мир», 1976. – 464 с.).
18. *Oden J.T., Key J.E.* Numerical analysis of finite axisymmetric deformation of incompressible elastic solids of revolution// Int. J. Solids Struct. – 1970. – № 6. – P. 497-518.
19. *Черных К.Ф.* Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчётах. – Изд-во «Машиностроение», 1986. – 216 с.
20. *Simo J.C., Laursen T.A.* An augmented Lagrangian treatment of contact problems involving friction// Comput. and Structures. – 1992. – Vol. 42, N 1. – P. 97-116.
21. *Галимов Н.К., Якупов С.Н.* К определению упругого потенциала сферических резиновых мембран // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2012. – № 4. – С.74-76.

Reference

1. *Neuber, H.* (1946). *Theory of Notch Stress*, Ann Arbor, Mich.: J.W. Edwards.
2. *Grover, H.J., Gordon, S.A. and Jackson, L.R.* (1956). *Fatigue of Metals Structures*, Thames and Hudson.
3. *Ponomarev, S.D., Biderman, V.L., et al* (1959). *Raschety na Prochnost v Mashinostroenii*, Vol. 3, Moscow: GNTI Mashinostroitel'noy literatury, 1119 p.
4. *Peterson, R.E.* (1974). *Stress Concentration Factors*, New York: J. Wiley & Sans.
5. *Collins, J.A.* (1981). *Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis, Prediction, Prevention*, The Ohio State University, New York: J. Wiley & Sans, 624 p.
6. *Yakupov, N.M.* (2010). *Mehanika – Problema – Ideya – Praktika*, Kazan: Kaz. Gos. Un-t, 161 p.
7. *Kirsch, G.* (1898). *Die Theorie der Elasticitat und die Bedurfnisse der Festigkeitlehre*, «VDI Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure», Bd. 32.

8. Segal, A., Klosner, J.M. (1970). Stress concentration in an elastomeric sheet subject to large deformations, PIBAL Rep. 70-11. Polytechnic Inst. of Brooklyn, March. 1970, 11 p.
9. Yakupov, N.M., Kiyamov, H.G., Yakupov, S.N., Kiyamov, I.H. (2011). The Modelling of elements of structures of complex geometry by three-dimensional finite elements, *Mehanika kompozitnykh Materialov i Konstruktsiy*, №1, p.145-154.
10. Kanyukov, R.A., Yakupov, N.M., Tameev, I.M., Yakupov, S.N., Kiyamov, H.G., Kanyukov, R.R. (2012). The modelling of stress-strain state of cylindrical body with local in-depth by 3D finite elements, *Nauka i Tehnika v Gazovoy Promyshlennosti*, № 2, p. 53-60.
11. Yakupov, S.N., Kiyamov, I.H. (2014). Analysis of the mode of deformation of spherical covers three-dimensional elements, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, No 2, p. 76-80.
12. Kanyukov, R.A., Yakupov, N.M., Tameev, I.M., Kiyamov, H.G., Yakupov, S.N., Kanyukov, R.R. (2013). Concentration of stresses in a pipe with long in-depth, *Gazovaya Promyshlennost*, №7, p. 28-30.
13. Treloar, L.R.G. (1953). *Physics of Elasticity of Rubber*, M: Izd-vo "Inostran. Literatura", 336 p.
14. *Raschety na Prochnost v Mashinostroenii* (1958), Vol. 2, Izd-vo "Mashgiz", 944 p.
15. Green, A.E., Zerna, W. (1960). *Theoretical Elasticity*, Oxford University Press, Oxford.
16. Klosner, J.M., Segal, A. (1969). Mechanical characterization of a natural rubber, PIBAL Rep. 69-42. Polytechnic Inst. of Brooklyn, N.Y., 42 p.
17. Oden, J.T. (1972). *Finite Elements of Nonlinear Continua*, McGraw-Hill BOOK COMPANY. 464 p.
18. Oden, J.T., Key, J.E. (1970). Numerical analysis of finite axisymmetric deformation of incompressible elastic solids of revolution, *Int. J. Solids Struct.*, № 6, p. 497-518.
19. Chernyh, K.F. (1986). *Nelineynaya Teoriya Uprugosti v Mashinostroitel'nykh Raschotakh*, Izd-vo "Mashinostroenie", 216 p.
20. Simo, J.C., Laursen, T.A. (1992). An augmented Lagrangian treatment of contact problems involving friction, *Comput. and Structures*, Vol. 42, N 1, p. 97-116.
21. Galimov, N.K., Yakupov, S.N. (2012). On the determination of elastic potential of spherical rubber membranes, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, № 4, p.74-76.

ANALYSIS OF THE STRESS CONCENTRATION IN THIN-WALLED ELEMENTS OF STRUCTURES WITH LOCAL IN-DEPTH

S.N. Yakupov, T.R. Nasibullin

Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences

One must use a three-dimensional approach to determine the concentration of stresses in thin-walled elements of structures with local deepening or defects. The stress concentration is analyzed for shells and panels with local deepening. The authors investigated the effect of the finite element partition of a panel on the results and the concentration of the stress for the panels made from the different type of material: the model of Hooke and the model of Neo-Hooke (rubber-like material).

KEYWORDS: spherical shell, cylindrical shell, plane model, local in-depth, 3D finite element, stress-strain state, concentration of stress, the model of Hooke, the model of Neo-Hooke.



МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Ф.С. ХАЙРУЛЛИН, доктор физико-математических наук, доцент,

О.М. САХБИЕВ, инженер,

Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420029, Казань, Сибирский тракт 12, кафедра теоретической механики и сопротивления материалов; X_farid@mail.ru, somkazan@yandex.ru,

В работе предлагается вариационный метод расчета трехмерных упругих конструкций, основанный на использовании функций с конечными носителями произвольной степени аппроксимации, позволяющих определять напряженно-деформированное состояние конструкций с криволинейными граничными поверхностями, а также составных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вариационный метод, трехмерные конструкции, напряженное состояние, аппроксимация.

Для определения напряженно-деформированного состояния трехмерных конструкций сложной формы используется в основном методом конечных элементов [1-2]. В работе излагается вариационный метод расчета трехмерных конструкций, который позволяет определять напряженно-деформированное состояние конструкций с криволинейными граничными поверхностями, а также

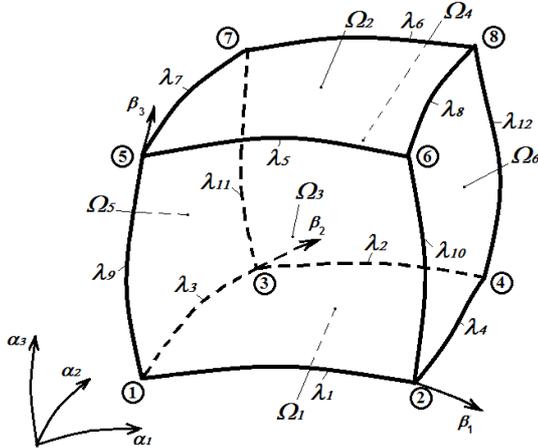


Рис.1

составных конструкций. Данный метод основан на методе расчета тонких оболочек, предложенном в работе [3]. Рассмотрим деформацию трехмерной конструкции, ограниченной кусочно-гладкими поверхностями. Предполагается, что перемещения и деформации малы, материал тела изотропен, справедлив закон Гука. Конструкция разбивается на подобласти V_k в виде шестигранников (рис. 1) с криволинейными гладкими гранями $\Omega_i, i = \overline{1,6}$, которые в ортогональной системе координат $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ описываются уравнениями $\alpha_3 = F_1(\alpha_1, \alpha_2), \alpha_3 = F_2(\alpha_1, \alpha_2), \alpha_2 = F_3(\alpha_3, \alpha_1), \alpha_2 = F_4(\alpha_3, \alpha_1), \alpha_1 = F_5(\alpha_2, \alpha_3), \alpha_1 = F_6(\alpha_2, \alpha_3)$, где $F_i, i = \overline{1,6}$ - однозначные функции класса C^1 ; $\lambda_j, j = \overline{1,12}$ - граничные линии.

Причем уравнения граней задаются относительно соответствующих координатных плоскостей. Здесь и в дальнейшем для упрощения последующих записей у введенных величин опускаем индекс k , показывающий принадлежность к подобласти V_k , в кружечках показаны номера угловых точек (узлов).

В подобласти V_k вводится локальная криволинейная система координат $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, связанная с системой координат $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= F_5(\alpha_2^{15}, \alpha_3^{15})(1 - \beta_1) + F_6(\alpha_2^{16}, \alpha_3^{16})\beta_1 + \alpha_1^0, \\ \alpha_2 &= F_3(\alpha_3^{13}, \alpha_1^{13})(1 - \beta_2) + F_4(\alpha_3^{14}, \alpha_1^{14})\beta_2 + \alpha_2^0, \\ \alpha_3 &= F_1(\alpha_1^{11}, \alpha_2^{11})(1 - \beta_3) + F_2(\alpha_1^{12}, \alpha_2^{12})\beta_3 + \alpha_3^0, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_2^{15} &= f_{59}(g_9(s_9^0 \beta_3))(1 - \beta_2) + f_{5,11}(g_{11}(s_{11}^0 \beta_3))\beta_2 + q_{51}(\beta_2, \beta_3), \\ \alpha_3^{15} &= f_{53}(g_3(s_3^0 \beta_2))(1 - \beta_3) + f_{57}(g_7(s_7^0 \beta_2))\beta_3 + q_{52}(\beta_2, \beta_3), \\ \alpha_2^{16} &= f_{6,10}(g_{10}(s_{10}^0 \beta_3))(1 - \beta_2) + f_{6,12}(g_{12}(s_{12}^0 \beta_3))\beta_2 + q_{61}(\beta_2, \beta_3), \\ \alpha_3^{16} &= f_{64}(g_4(s_4^0 \beta_2))(1 - \beta_3) + f_{68}(g_8(s_8^0 \beta_2))\beta_3 + q_{62}(\beta_2, \beta_3), \\ \alpha_1^0 &= q_{11}(\beta_1, \beta_2)(1 - \beta_3) + q_{21}(\beta_1, \beta_2)\beta_3, \\ q_{51}(\beta_2, \beta_3) &= \begin{bmatrix} g_3(s_3^0 \beta_2) - \alpha_{21}(1 - \beta_2) & -\alpha_{23}\beta_2 \end{bmatrix} (1 - \beta_3) + \\ &+ \begin{bmatrix} g_7(s_7^0 \beta_2) - \alpha_{25}(1 - \beta_2) & -\alpha_{27}\beta_2 \end{bmatrix} \beta_3, \\ q_{52}(\beta_2, \beta_3) &= \begin{bmatrix} g_9(s_9^0 \beta_3) - \alpha_{31}(1 - \beta_3) & -\alpha_{35}\beta_3 \end{bmatrix} (1 - \beta_2) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[g_{11}(s_{11}^o \beta_3) - \alpha_{33}(1 - \beta_3) - \alpha_{37} \beta_3 \right] \beta_2, \\
 q_{61}(\beta_2, \beta_3) & = \left[g_4(s_4^o \beta_2) - \alpha_{22}(1 - \beta_2) - \alpha_{24} \beta_2 \right] (1 - \beta_3) + \\
 & + \left[g_8(s_8^o \beta_2) - \alpha_{26}(1 - \beta_2) - \alpha_{28} \beta_2 \right] \beta_3, \\
 q_{62}(\beta_2, \beta_3) & = \left[g_{10}(s_{10}^o \beta_3) - \alpha_{32}(1 - \beta_3) - \alpha_{36} \beta_3 \right] (1 - \beta_2) + \\
 & + \left[g_{12}(s_{12}^o \beta_3) - \alpha_{34}(1 - \beta_3) - \alpha_{38} \beta_3 \right] \beta_2. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Здесь для сокращения записей приведены соотношения, определяющие в формулах (1) только координату α_1 . Для остальных координат эти соотношения записываются аналогично. В соотношениях (2) $y = f_{ij}(x)$ - уравнения проекций граничных линий λ_j поверхностей Ω_i на соответствующие координатные плоскости; $x = g_j(s_j)$ - функции, определяющие координату точки на оси x по соответствующей дуговой координате s_j на линии λ_j ; s_j^o - длины дуг линий λ_j ; $\alpha_{1l}, \alpha_{2l}, \alpha_{3l}, l = \overline{1,8}$ - координаты угловых точек подобласти V_j . В этих формулах величинами x, y обозначены координаты α_1, α_2 или α_3 , которые выбираются в соответствии с задаваемой линией λ_j . Например, для линии λ_5 поверхности Ω_2 координаты $x = \alpha_1, y = \alpha_2$, уравнение граничной линии $\alpha_2 = f_{25}(\alpha_1)$. Функция $\alpha_1 = g_5(s_5)$ для точки, находящейся на линии λ_5 , имеющей дуговую координату s_5 , определяет координату на оси α_1 (рис.2).

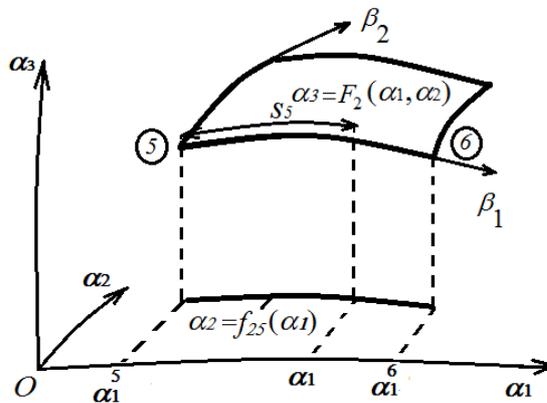


Рис.2

Система координат $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ в соответствии с соотношениями (1) - (2) выбрана таким образом, что в подобласти V_k выполняются условия $0 \leq \beta_1, \beta_2, \beta_3 \leq 1$, грани Ω_i задаются уравнениями $\beta_l = 0$ или $\beta_l = 1, l = \overline{1,3}$; граничные линии λ_j задаются одной из координат $\beta_l, l = \overline{1,3}$. На гранях Ω_i уравнения (1) переходят в уравнения этих граней. Например, если в эти уравнения подставить $\beta_3 = 0$, то получаются уравнения, определяющие грань Ω_1 :

$$\alpha_1 = \alpha_1^{11}, \alpha_2 = \alpha_2^{11}, \alpha_3 = F_1(\alpha_1^{11}, \alpha_2^{11}) \quad (0 \leq \beta_1, \beta_2 \leq 1). \quad (3)$$

На граничных линиях уравнения (1) переходят в уравнения этих линий. Например, если в уравнениях (3) задать $\beta_1 = 1$, то получается уравнение линии λ_4 :

$$\alpha_1 = f_{14}(g_4(s_4^0 \beta_2)), \alpha_2 = g_4(s_4^0 \beta_2), \alpha_3 = F_1(\alpha_1, \alpha_2) \quad (0 \leq \beta_2 \leq 1).$$

При решении задач предполагается, что исследуемую трехмерную конструкцию можно разбить на подобласти вида V_k . Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции используется вариационный принцип Лагранжа [4], на основании которого должно выполняться условие

$$\delta E = \sum_{k=1}^K \delta E_k(U) = \sum_{k=1}^K \int (\delta \Pi_k - \delta' W_k) d\Omega = 0, \quad (4)$$

где E – полная энергия конструкции, E_k – полная энергия подобласти V_k ; Π_k , $\delta' W_k$ – соответственно удельная потенциальная энергия деформации и вариация работы внешних сил единицы объема подобласти V_k ; $U = \{u_1, u_2, u_3\}^T$ – вектор перемещений подобласти V_k в системе координат $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$; K – количество подобластей.

В подобласти V_k компоненты перемещения аппроксимируются функциями, заданными в системе координат $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ следующим образом:

$$U(V_k) = \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} \sum_{m_3=1}^{M_3} D_{m_1 m_2 m_3}^k t_{m_1}(\beta_1) t_{m_2}(\beta_2) t_{m_3}(\beta_3), \quad (5)$$

где $D_{m_1 m_2 m_3}^k$ – вектор неизвестных постоянных; функции формы

$$t_1(\beta_1) = 1 - \beta_1, \quad t_2(\beta_1) = \beta_1, \quad t_m(\beta_1) = t_1(\beta_1) [t_2(\beta_1)]^{m-2} \quad (m = \overline{3, M}). \quad (6)$$

На граничных поверхностях Ω_i^k подобласти V_k трехмерные полиномы (5) переходят в двумерные полиномы. Например, для грани Ω_1^k , где $\beta_3 = 0$,

$$U(\Omega_1^k) = \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} D_{m_1 m_2 1}^k t_{m_1}(\beta_1) t_{m_2}(\beta_2). \quad (7)$$

На граничных линиях λ_j^k двумерные полиномы вида (7) переходят в одномерные полиномы. Например, на линии λ_4^k при $\beta_1 = 1$:

$$U(\lambda_4^k) = \sum_{m_2=1}^{M_2} D_{2 m_2 1}^k t_{m_2}(\beta_2). \quad (8)$$

Если, например, для линии λ_4^k определить значения в угловых точках, то

$$U(\lambda_4^k) \Big|_{\beta=0} = D_{211}^k, \quad U(\lambda_4^k) \Big|_{\beta=1} = D_{221}^k. \quad (9)$$

Из формул вида (7) следует, что на каждой из поверхностей Ω_i^k искомые функции определяются двумерными полиномами, зависящими только от двух криволинейных координат из трех. Эти криволинейные координаты с учетом соотношений вида (3) зависят только от уравнений, задающих поверхность Ω_i^k . Это обеспечивает непрерывность искомых функций при переходе из одной подобласти на другую и позволяет легко выполнять геометрические граничные условия и условия стыковки искомых функций на границах подобластей V_k .

Например, если граничная поверхность Ω_2^1 (рис.1), которая является верхней гранью подобласти V_1 , стыкуется с поверхностью Ω_1^2 , которая является нижней гранью подобласти V_2 , то для обеспечения непрерывности вектора перемещений U достаточно выполнить условия $D_{m_1 m_2 2}^1 = D_{m_1 m_2 1}^2, m_1 = \overline{1, M_1}, m_2 = \overline{1, M_2}$. Если на границе Ω_3^k подобласти V_k заданы граничные условия $U = 0$, то необходимо положить $D_{m_1 m_2 3}^k = 0, m_1 = \overline{1, M_1}, m_2 = \overline{1, M_2}$. Если требуется выполнить стыковку подобластей по некоторой линии, например, граничная линия λ_8^1 поверхности Ω_2^1 подобласти V_1 совпадает с линией λ_3^2 поверхности Ω_1^2 подобласти V_2 , то достаточно в соответствии с формулами вида (8) удовлетворить условиям

$$D_{2 m_2 2}^1 = D_{1 m_2 1}^2, m_2 = \overline{1, M_2}.$$

Из всех неизвестных постоянных $D_{m_1 m_2 m_3}^k$, входящих в аппроксимирующую функцию (5), в соответствии с формулами вида (9) только постоянные $D_{m_1 m_2 m_3}^k, m_1 = \overline{1, 2}, m_2 = \overline{1, 2}, m_3 = \overline{1, 2}$ имеют механический смысл. Они определяют перемещения угловых точек подобласти V_k , т.е. являются узловыми значениями. Подставляя аппроксимирующие функции (5) в вариационное уравнение (4), удовлетворяя соответствующим граничным условиям и условиям стыковки подобластей, после численного интегрирования по некоторой квадратурной формуле получается система линейных уравнений относительно неизвестных постоянных $D_{m_1 m_2 m_3}^k$:

$$[K] D = P,$$

где $[K]$ - матрица жесткости конструкции, D - вектор неизвестных постоянных, составленный соответствующим образом из векторов $D_{m_1 m_2 m_3}^k, P$ - вектор правой части, учитывающий действие внешних нагрузок.

Для исследования сходимости решения в таблице 1 приводятся значения максимального перемещения u_{\max} , максимального растягивающего σ_{\max}^p и максимального сжимающего σ_{\max}^c напряжений для кубика, представленного на рис. 3. Одна грань кубика, задаваемая уравнением $y = 0$, жестко закреплена, на одной из перпендикулярных к ней граней (уравнение $z = a$) действует равномерно распределенная растягивающая нагрузка интенсивности q . Расчеты получены для следующих числовых параметров: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0,3; a = b = 1$ см, $q = 1$ МПа.

Таблица 1

| $M_1 = M_2 = M_3$ | 3 | 4 | 5 | 6 | Ansys | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | 10 | 20 |
| $u_{\max} \cdot 10^6, \text{ см}$ | 1.49 | 1.69 | 1.69 | 1.72 | 1.70 | 1.72 |
| $\sigma_{\max}^p, \text{ МПа}$ | 2.63 | 4.50 | 4.98 | 5.96 | 4.15 | 5.40 |
| $\sigma_{\max}^c, \text{ МПа}$ | -3.14 | -5.22 | -6.06 | -7.35 | -4.94 | -6.67 |

Максимальное перемещение возникает в точке A по направлению оси z , максимальное растягивающее напряжение – в точке D по направлению оси y , максимальное сжимающее напряжение – в точке B по направлению оси y , т.е.

$$u_{\max} = u_z^A, \sigma_{\max}^p = \sigma_{yy}^D, \sigma_{\max}^c = \sigma_{yy}^B.$$

Для подтверждения достоверности результатов в последних двух столбцах представлены соответствующие величины, полученные с помощью пакета программ «Ansys». В первом столбце приведены результаты, которые получены при линейной аппроксимации компонент перемещений на сетке $10 \times 10 \times 10$, во втором столбце – на сетке $20 \times 20 \times 20$.

В табл. 2 приводятся результаты расчета той же самой конструкции, когда принимались следующие геометрические размеры: $a = 10 \text{ см}$, $b = 100 \text{ см}$, т.е. рассматривалась балка. Конструкция разбивалась на два элемента по сечению $y = 10 \text{ см}$. Приведены значения напряжений σ_{yy} на нижней поверхности балки в двух точках для двух поперечных сечений: в заделке ($y = 0$) и в середине балки ($y = 50 \text{ см}$). В последней строке приведены значения напряжений, полученные методами сопротивления материалов [5].

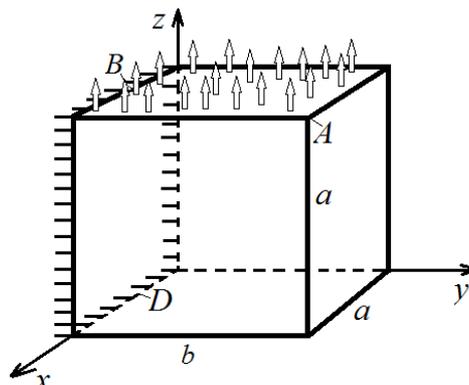


Рис. 3

Таблица 2

| $M_1 \times M_2$ | $y = 0$ | | $y = 50 \text{ см}$ | |
|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | $x = 5 \text{ см}$ | $x = 10 \text{ см}$ | $x = 5 \text{ см}$ | $x = 10 \text{ см}$ |
| 2x4 | 309 | 309 | 88.8 | 88.8 |
| 3x4 | 300 | 367 | 89.5 | 89.7 |
| 4x4 | 346 | 389 | 89.3 | 89.4 |
| 2x5 | 304 | 304 | 75 | 75 |
| 3x5 | 284 | 375 | 75 | 75.2 |
| 4x5 | 349 | 404 | 74.7 | 74.9 |
| 5x5 | 376 | 451 | 74.8 | 75 |
| 2x6 | 301 | 301 | 75 | 75 |
| 3x6 | 273 | 378 | 74.9 | 75.1 |
| 4x6 | 355 | 411 | 74.7 | 74.8 |
| 5x6 | 389 | 482 | 74.7 | 74.8 |
| 6x6 | 424 | 501 | 74.8 | 74.8 |
| [4] | 300 | 300 | 75 | 75 |

Как видно из представленных результатов уже при порядке аппроксимирующей функции 2x5 (т.е. в поперечном сечении балки искомые функции аппроксимируются линейными функциями) получается решение, совпадающее с решением, найденным методами сопротивления материалов. При увеличении порядка аппроксимирующей функции в поперечном сечении балки напряжения в заделке ($y=0$) начинают возрастать, т.е. приведенное решение улавливает концентрацию напряжений. Причем в угловой точке ($x = 10 \text{ см}$) напряжения выше, чем посередине поперечного сечения балки ($x = 5 \text{ см}$). В точках удаленных от заделки ($y = 50 \text{ см}$) напряжения совпадают с решением, полученным методами сопротивления материалов.

Л и т е р а т у р а

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 511 с.
3. Хайруллин Ф.С. Метод расчета тонких оболочек сложной формы// Известия РАН. Механика твердого тела. - 1998, № 3. - С. 30 - 33.

4. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. – М.: Наука, 1978. – 288 с.
5. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. - М.: Наука, 1979. – 560 с.

References

1. Gallagher, R. (1984). *Metod Konechnih Elementov. Osnovi*. – М.: “Mir”, 428 p.
2. Zenkevich, O. (1975). *Metod Konechnih Elementov v Tehnike*. – М.: “Mir”, 511 p.
3. Khayrullin, F.S. (1998). A Method of Analysis of Thin Shells of Complex Form, *Izvestia RAN. Mehanika Tverdogo Tela*, № 3, p. 30-33.
4. Abovskii, N.P., Andreev, N.P., Deruga, A.P. (1978). *Variazionnii Prinzipi Teorii Uprugosti i Teorii Obolochek*, Moscow: “Nauka”, 288 p.
5. Pheodosiev, V.I. (1979). *Soprotivlenie materialov*, Moscow: “Nauka”, 560 p.

**A METHOD OF DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE
OF 3D STRUCTURES OF COMPLEX FORM**

Khayrullin F. S, Sahbiev O.M.

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

In the article, the variation method of definition of the tense-deformed condition of three-dimensional constructions is offered which based on using of functions with final carriers of any extent of approximation that allows making calculations of constructions with curvilinear boundary surfaces, and also compounding constructions.

KEYWORDS: three-dimensional constructions, variation method, tense condition, approximation.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПЛАВКИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ
НА РАСКРЫТИЕ ТРЕЩИНЫ В ТРУБОПРОВОДЕ Ду850
ИЗ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ**

Д.А. КУЗЬМИН, аспирант
109431, Москва, ул. Ферганская, 25, АО «ВНИИАЭС»
Kuzmin_DA@yahoo.com

Исследован трубопровод с наплавкой. Показано, что происходит с основным металлом трубопровода, если он плакирован наплавкой, при нормальных условиях эксплуатации, исследованы полученные напряжения и деформации. Изучено влияние наплавки на образовавшуюся сквозную трещину в трубопроводе и ее влияние на раскрытие трещины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубопровод, наплавка, раскрытие трещины, деформация.

Концепция «течь перед разрушением» (ТПР) – это концепция конструирования сосудов давления, при котором полному разрушению сосуда предшествует бы течь через относительно устойчивую трещину.

Обзор теории и практики применения концепции ТПР дан в работе [1]. Для применения концепции ТПР требуется правильно оценивать раскрытие трещин и ее размеры. Критический размер трещин – размер, достижение и превышение которого приводит к быстрому, неуправляемому и окончательному разрушению конструкции.

В реакторостроении получили распространение трубопроводы из углеродистых и углеродистых малолегированных сталей с антикоррозионной наплавкой из стали аустенитного класса. Указанные стали имеют разные коэффициенты линейного расширения, что при нагреве приводит к возникновению больших сжимающих напряжений в наплавке. Большие сжимающие напряжения в наплавке могут препятствовать раскрытию сквозных трещин в трубопроводе и истечению теплоносителя из него. Этот эффект до сих пор не учитывают

существующие нормативные документы, регулирующие применение концепции ТПР на АЭС как в России [2], так и за рубежом, в частности, в США [3] и Германии [4]. При этом наличие антикоррозионной наплавки учитывается только прибавлением ее толщины к толщине основного металла. При определении площади раскрытия трещины и расхода теплоносителя толщина стенки расчетного компонента определяется с учетом толщины слоя наплавки.

В действительности наплавка оказывает существенное влияние на раскрытие трещины, так как сжимающие напряжения в ней при работе реактора, например, ВВЭР-1000 близки к напряжениям предела текучести [1].

Действительно, при разогреве реактора с 20°C до 300°C получим термические напряжения сжатия в наплавке -283 МПа (расчет будет показан далее).

Следует отметить, что ряд исследователей считает, что после изготовления трубопровода в наплавке остаются при нормальной температуре напряжения растяжения. В действительности эти напряжения релаксируются при первых циклах гидравлических испытаний (ГИ) на прочность, которые проводят до начала эксплуатации.

При давлении ГИ $p_{\text{ГИ}} = 24,5\text{ МПа}$ и нормальной температуре в трубопроводе возникают напряжения растяжения равные [5]

$$\sigma_{\text{ГИ}} = \frac{p_{\text{ГИ}} R}{S} = \frac{24,5 \cdot 495}{70} \text{ МПа} = 173,3 \text{ МПа},$$

где R – срединный радиус главного циркуляционного трубопровода ВВЭР-1000, S – толщина стенки трубопровода с учетом наплавки.

Так как остаточные напряжения в наплавке не могут превышать предел текучести, то в результате ГИ напряжения в наплавке релаксируют с $+216\text{ МПа}$ до $+42,7\text{ МПа}$. С учетом термического воздействия напряжения при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) составляют:

$$-283 + 42,7 = -240,3 \text{ МПа} > R_{p0,2} \text{ (при } t = 300^{\circ}\text{C)}.$$

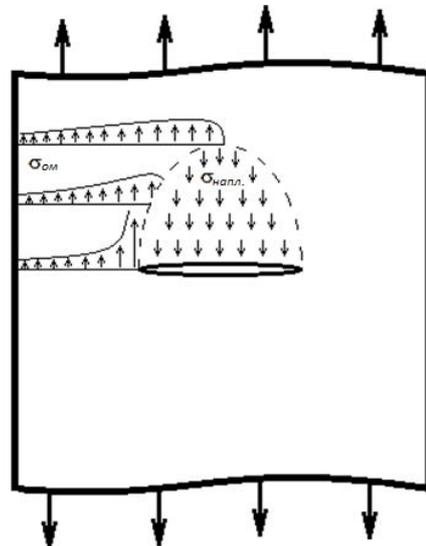


Рис. 1. Действие напряжений в области трещины

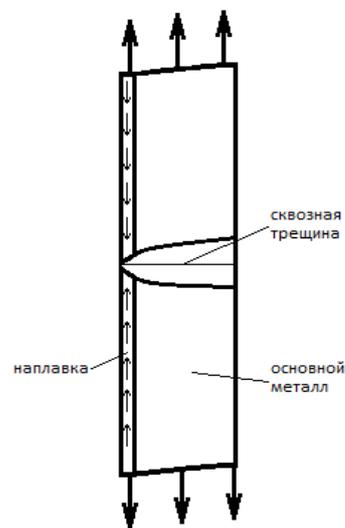


Рис. 2. Действие напряжений в области трещины

Так как эти напряжения выше $R_{p0,2}$, то в действительности в наплавке будут напряжения сжатия: $\sigma_{\text{напл.}}^{t=300^{\circ}\text{C}} = -177\text{ МПа}$.

Напряжения $\sigma_{\text{ом}}$ в основном металле раскрывают трещину, а напряжения $\sigma_{\text{напл.}}$ в наплавке закрывают, вид распределений показан на рис. 1, а на рис. 2 вид разреза вдоль образующей трубопровода.

Практика эксплуатации дает пример, когда сквозная трещина длиной 1300 мм в основном металле с толщиной стенки 170 мм удерживалась наплавкой толщиной 7 мм при давлении 160 атм.

В данной статье исследовано влияние разницы коэффициентов температурного расширения основного металла из перлитной стали и наплавки из нержавеющей аустенитной стали на возможность обеспечения безопасности эксплуатации главных циркуляционных трубопроводов АЭС.

Главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) на АЭС типа ВВЭР-1000 имеет внутренний диаметр 850 мм, толщину 70 мм, где основной металл (1) 63 мм из стали 10ГН2МФА, а антикоррозионная наплавка (2) 7 мм из стали 08Х18Н10Т (см. рис. 3).

Механические характеристики стали 10ГН2МФА: $E = 195 \text{ ГПа}$,

$$\alpha = 13,1 \text{ мкК}^{-1}, R_{p0,2} = 304 \text{ МПа}, R_m = 491 \text{ МПа}, \text{ при } t = 300^{\circ} \text{С}.$$

Механические характеристики стали 08Х18Н10Т: $E = 180 \text{ ГПа}$,

$$\alpha = 17,4 \text{ мкК}^{-1}, R_{p0,2} = 177 \text{ МПа}, R_m = 412 \text{ МПа}, \text{ при } t = 300^{\circ} \text{С}.$$

Теплоноситель ГЦТ – вода с температурой 300°С и давлением 16 МПа.

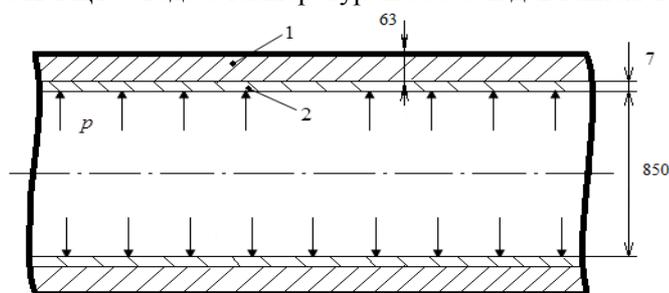


Рис. 3. Элемент трубопровода Ду850

Прямолинейный участок трубопровода рассмотрен в программном комплексе ANSYS. Решение задачи выполнено в упругой постановке:

- 1) прямолинейный участок трубопровода находится под действием внутреннего давления $p = 16 \text{ МПа}$;
- 2) эта же часть трубопровода нагревается до температуры $t = 300^{\circ} \text{С}$;
- 3) проводится суперпозиция результатов.

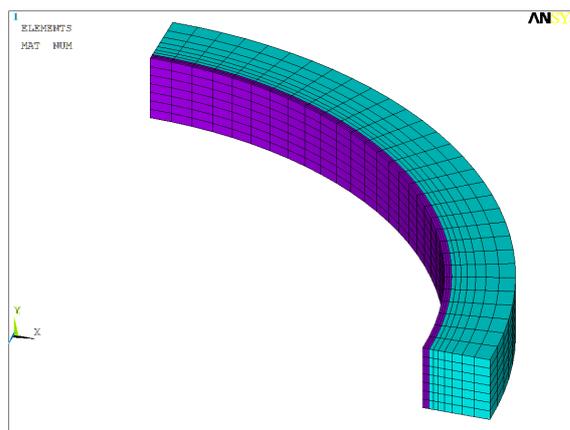


Рис. 4. Конечно-элементная сетка

Для решения задачи рассмотрена четверть окружности трубопровода протяженностью 70 мм и толщиной 70 мм, где 63 мм – основной металл, а 7 мм – наплавка. Далее разбивается модель на конечные элементы (см. рис. 4).

Далее представлены три рисунка с напряженно-деформированным состоянием (НДС) трубопровода при различных начальных условиях:

- 1) внутреннее давление $p = 16$ МПа (см. рис. 5);
- 2) температурное воздействие $t = 300^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 6);
- 3) внутреннее давление $p = 16$ МПа и температурное воздействие $t = 300^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 7).

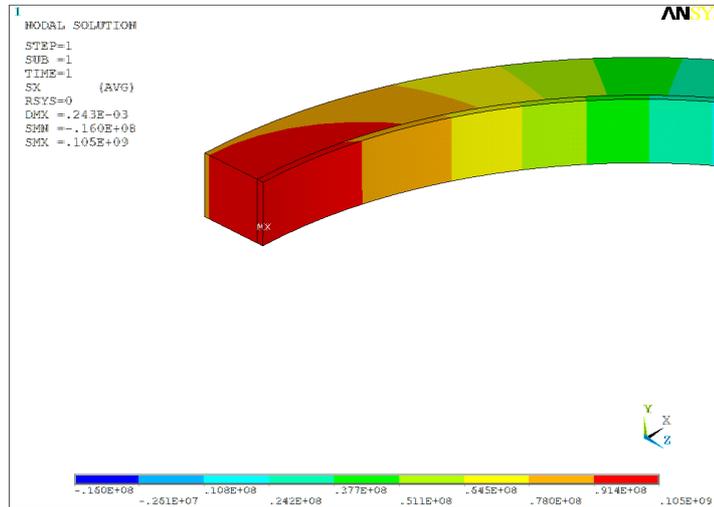


Рис. 5. Напряжение σ_x , (σ_θ - на торце YZ), (Па)

Полученный результат на рис. 5 ($\sigma_\theta = 105$ МПа) можно проверить с помощью уравнения сопротивления материалов:

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{S}, \quad \sigma_\theta = \frac{16 \text{ МПа} \cdot 495}{70} = 113,1 \text{ МПа}. \quad (1)$$

Расхождение результатов удовлетворительное.

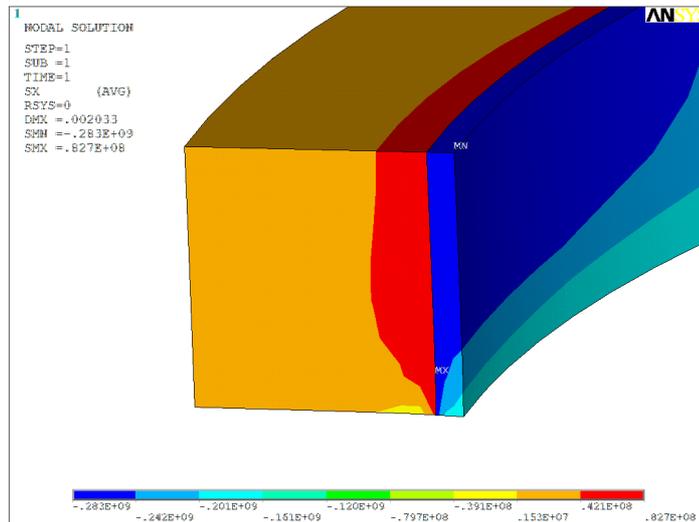


Рис. 6. Напряжение σ_x , (σ_θ - на торце YZ), (Па)

Полученный результат на рисунке 6 ($\sigma_\theta = -283$ МПа) можно проверить с помощью норм расчета на прочность [5].

Нижняя граница напряжений в наплавке при условии, что толщина наплавки равна толщине основного металла, определяется по формуле:

$$\sigma_{\theta} = T\Delta\alpha \frac{1}{2(1-\nu)} E = 300\text{град} \cdot (17,4 - 13,1) \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}} \cdot \frac{1}{2(1-0,3)} \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{Па} = 184\text{МПа},$$

Максимальное возможное напряжение в наплавке (когда наплавка находится на абсолютно жестком основании) определяется по формуле:

$$\sigma_{\theta} = T\Delta\alpha \frac{1}{(1-\nu)} E = 300\text{град} \cdot (17,4 - 13,1) \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}} \cdot \frac{1}{(1-0,3)} \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{Па} = 369\text{МПа}.$$

Проверка подтверждает корректность полученных результатов:

$$\sigma_{\theta} = 184 < 283 < 369 \text{ (МПа)}.$$

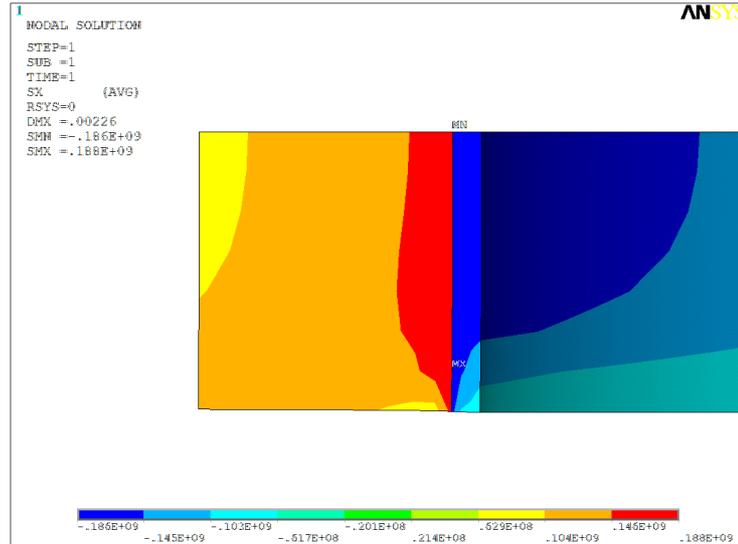


Рис. 7. Напряжение σ_x , вид с торца YZ, (σ_{θ} - на торце YZ), (Па)

Вышеописанные результаты показывают, какое влияние наплавка оказывает на основной металл. Наплавка находится в сжатом состоянии, тем самым растягивает основной металл в месте наплавления, что существенно сказывается на напряженно-деформированном состоянии основного металла.

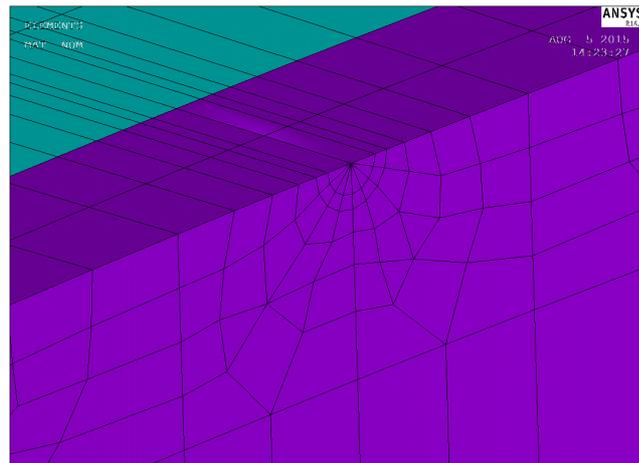


Рис. 8. Конечно-элементная сетка в области трещины

Ниже рассмотрена аналогичная задача, но со сквозной трещиной. Построена модель прямолинейного участка трубопровода длиной 200 мм, толщиной 70 мм (в т.ч. основной металл 63 мм и наплавка 7 мм) и разбита на конечные эле-

менты (КЭ) типа solid186. Число конечных элементов 10390. Конечно- элементная сетка в области трещины – на рис. 8. Длины заложённых кольцевых трещин составляют: $2\varphi = 30, 60, 90, 120$ и 150 градусов.

Середина трещины (линия симметрии) обозначена красным цветом и названа KRAI (см. рис. 9).

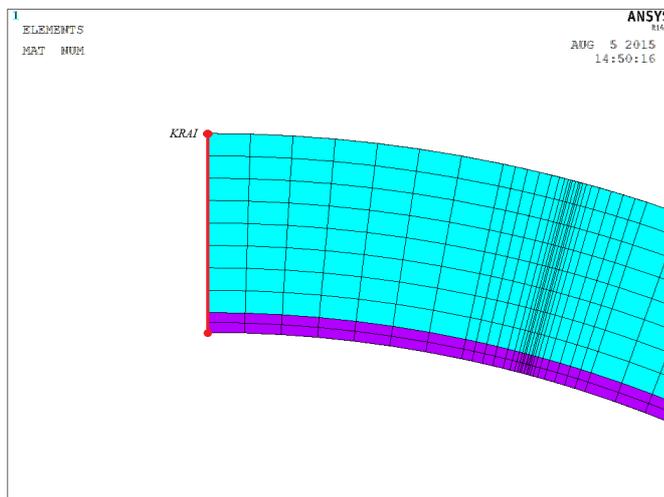


Рис. 9. Конечно-элементная сетка (вид сверху)

При данной постановке задачи интересна деформация середины трещины (линия KRAI) и длина трещины, при которой образуется беспрепятственное истечение теплоносителя. На рис. 10 показано деформированное состояние трещины, где Δ_1 – деформация по внутреннему радиусу трубопровода линии KRAI относительно фронта трещины в плоскости образования трещины, а Δ_2 – по внешнему.

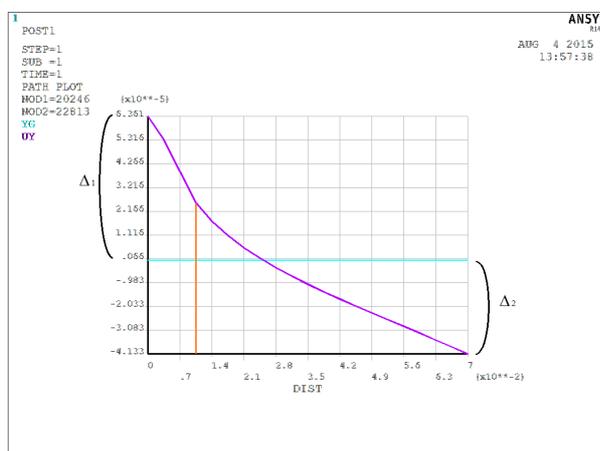


Рис. 10. График перемещений (U_y , м), при $2\varphi = 30^\circ$

На рис. 10 показано, что наплавка термическими напряжениями сжатия закрывает трещину, что препятствует истечению теплоносителя. Ниже приведены результаты подобных задач с различной длиной трещины, длина трещины обозначена через угол $2\varphi = 60, 90, 120$ и 150 градусов.

Из полученных данных на рис. 11 можно отметить, что трещина раскрывается в диапазоне угла: $2\varphi = 90^\circ \div 120^\circ$, а именно после экстраполяции $2\varphi = 107^\circ$. Мембранные напряжения, раскрывающие трещину, равны [5]:

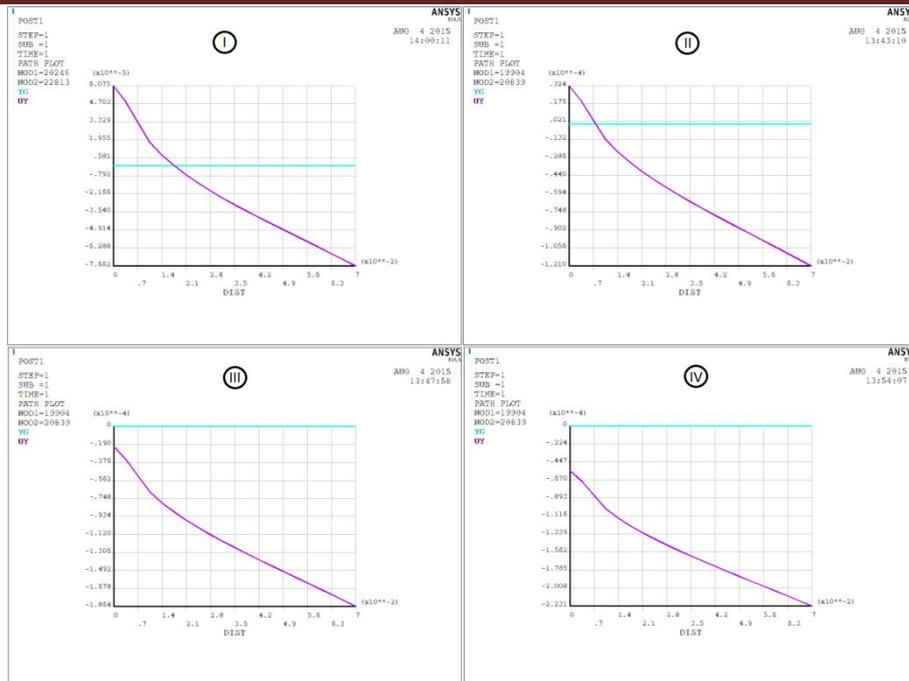


Рис. 11. Графики перемещений (U_y , м)

$I - 2\varphi = 60^\circ$, $II - 2\varphi = 90^\circ$, $III - 2\varphi = 120^\circ$, $IV - 2\varphi = 150^\circ$

$$\sigma_m = \frac{pR}{2S} = \frac{16 \text{ МПа} \cdot 495}{2 \cdot 70} = 56.6 \text{ МПа}.$$

Для определения критической длины трещины использован метод нагрузки пластического шарнира (НПШ), результаты изображены на рисунке 12. Для сквозных трещин критический размер равен $\varphi = 95^\circ$, а для $2\varphi = 190^\circ$.

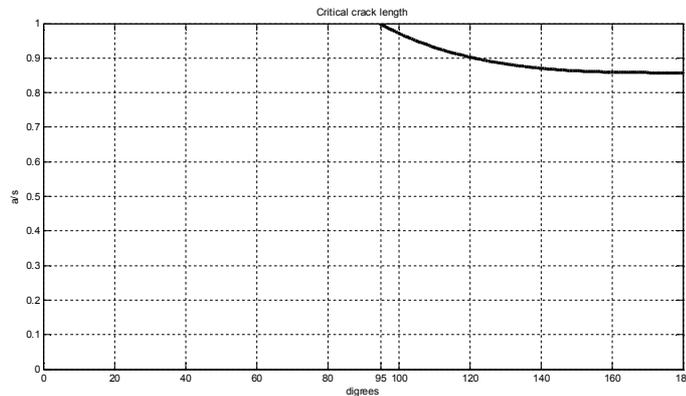


Рис. 12. График критических размеров трещин

Таким образом, выполненные оценки показали, что наплавка оказывает существенное влияние на раскрытие трещин. Трещина с учетом наплавки раскрывается, когда ее протяженность составляет $2\varphi = 107^\circ$, а без учета наплавки трещина раскроется при любых значениях 2φ .

Л и т е р а т у р а

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 258 с.

2. Руководство по применению концепции безопасности течь перед разрушением к трубопроводам действующих АЭУ. РД ЭО 1.1.2.05.0939, 2013. – 118 с.

3. US NRS Standard review plan, 3.6.3 Leak Before Break evaluation procedures, USNRC, Washington, DC, 1986.

4. GRS. RSK Guidelines for pressurized water reactors, 2nd Ed., 24 January 1979, including Appendix to Section 4.2; 3 rd Ed., 14 October 1981; Partly changes of RSK Guideline Sections 21.1 and 21.2, 1983.

5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 525 с.

References

1. Getman, A.F. (1999). «Leak Before Break» Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Pip-ing, Moscow: Energoatomizdat.

2. Guidance on the application of the safety concept «leak before break» operating pipelines NPP. RD EO 1.1.2.05.0939, 2013.

3. US NRS Standard review plan, 3.6.3 Leak Before Break evaluation procedures, USNRC, Wash-ington, DC, 1986.

4. GRS. RSK Guidelines for pressurized water reactors, 2nd Ed., 24 January 1979, including Ap-pendix to Section 4.2; 3 rd Ed., 14 October 1981; Partly changes of RSK Guideline Sections 21.1 and 21.2, 1983.

5. *The Rules for Calculating the Strength of the Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants.* Energoatomizdat. M., 1986.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF AUSTENITIC STEEL SURFACING ON CRACK OPENING OF PEARLITIC STEEL PIPELINE Du850

Kuzmin D.A., *VNIIAES, Russia*

A pipeline with surfacing is investigated. It is shown what happens to the base metal of the pipeline if it is clad with surfacing under normal operating conditions and the obtained stresses and strains are investigated.

The influence of surfacing on the through crack in the pipeline was investigated and its influence on a crack opening was also studied.

KEY WORDS: pipeline, surfacing, crack opening, strain.



Расчет и проектирование машиностроительных конструкций

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛОСЫ В УСЛОВИЯХ ОДНО- И ДВУХЗОННОЙ ПРОКАТКИ

Л.С. КОХАН *д-р техн. наук, проф.*,

Ю.А. МОРОЗОВ *канд. техн. наук, доц.*,*

Ю.Б. СЛАВГОРОДСКАЯ, *аспирант.*

*Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
111250, Москва, Б. Семеновская, 38, т. 8(916)877-66-96*; akafest@mail.ru**

Сравниваются энергосиловые параметры свободной прокатки полосы без натяжения и прокатки с одним участком отставания и опережения по очагу деформации. Приводятся зависимости выбора предельных значений заднего и переднего натяжений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прокатка, деформация, натяжение, нейтральное сечение, прокатка однозонная, давление прокатки.

Кинематика формоизменения полосы при прокатке обуславливает деление очага деформации на две зоны: отставание и опережение (рис. 1) [1-3].

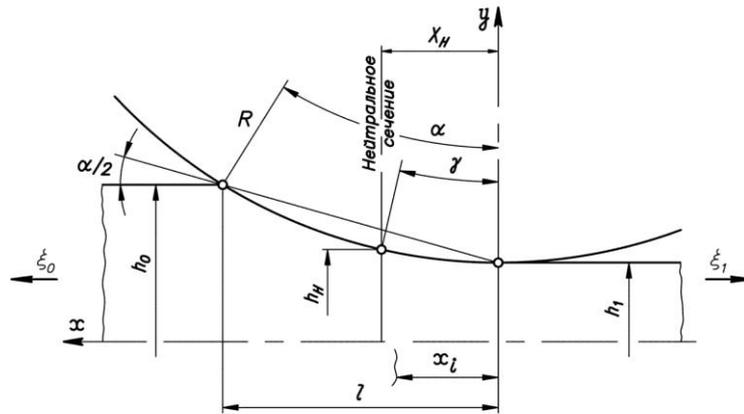


Рис. 1. Эюра распределения нормальных давлений по дуге захвата

Согласно гипотезе плоских сечений, нормальные напряжения в зонах отставания и опережения с учетом упрочнения материала

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \frac{\sigma_T}{\delta} \left[(\xi_0 \delta - k_{\text{упр}}) \left(\frac{h_0}{h_n} \right)^\delta + k_{\text{упр}} \right], \quad (1a)$$

$$\bar{\sigma}_{z \text{ оп}} = \frac{\sigma_T}{\delta} \left[(\xi_1 \delta + k_{\text{упр}}) \left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - k_{\text{упр}} \right], \quad (1б)$$

где σ_T – сопротивление металла пластической деформации; δ – основной параметр прокатки; $k_{\text{упр}}$ – коэффициент упрочнения материала полосы; ξ_0 , ξ_1 – коэффициенты заднего и переднего натяжения полосы; h_0 , h_1 – высота прокатываемой полосы на входе и выходе из валков; h_n – высота полосы в нейтральном сечении.

В зоне отставания линейная скорость полосы меньше окружной скорости валков, что обуславливает растяжение полосы валками. В зоне опережения, наоборот, большая скорость полосы вызывает ее сжатие.

Для устранения такого переменного напряженного состояния целесообразно производить прокатку с натяжением, смещающим нейтральное сечение к границам очага деформации, что будет характеризовать прокатку как однозонную, с одним лишь участком отставания или опережения.

Из курса теории прокатки известно, что натяжение смещает нейтральный угол в сторону, противоположную своему действию. Так, заднее натяжение переводит нейтральный угол в сторону выходного сечения $\gamma \rightarrow 0$. Соответственно, оно достигнет своего предельного значения, когда нейтральный угол будет равен нулю $\gamma = 0$. В этом случае очаг деформации будет состоять только из одной зоны отставания. И, наоборот: с увеличением переднего натяжения нейтральное сечение смещается в сторону входного сечения, увеличивая нейтральный угол. Предельная величина переднего натяжения переводит нейтральное сечение к входу $\gamma = \alpha$. В этом случае очаг деформации будет состоять из одной зоны опережения.

Дальнейшее увеличение натяжения приведет к простому растяжению полосы в результате чего возникнет опасность ее разрыва. Проиллюстрируем изложенное процессом холодной прокатки полосы толщиной $h_0 = 5,0$ мм в валках с катающим радиусом $R = 150$ мм и обжатием 20%.

Угол захвата полосы валками и основной параметр прокатки:

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_0}{R}} \varepsilon = \sqrt{\frac{5,0}{150}} 0,2 = 0,0816 \text{ рад (4,68 град); } \delta = \frac{2f}{\alpha} = \frac{2 \cdot 0,15}{0,0816} = 3,676,$$

где $f = 0,1 \dots 0,15$ – коэффициент трения при холодной прокатке.

Толщина полосы на выходе из очага деформации

$$h_1 = h_0 (1 - \varepsilon) = 5,0 (1 - 0,2) = 4,0 \text{ мм.}$$

Коэффициент упрочнения материала полосы и величина предельного коэффициента заднего натяжения для создания однозонной прокатки отставания [4-6]:

$$k_{\text{упр}} = 1,0 + \varepsilon = 1,0 + 0,2 = 1,2;$$

$$\xi_{0 \text{ min}} = \frac{(\delta - k_{\text{упр}})(1 - \varepsilon)^\delta + k_{\text{упр}}}{\delta} = \frac{(3,676 - 1,2)(1 - 0,2)^{3,676} + 1,2}{3,676} = 0,623.$$

Таким образом, чтобы процесс прокатки не перешел в растяжение, необходимо выполнение условия

$$\xi_0 \geq \xi_{0 \text{ min}}.$$

Для построения эпюры нормальных напряжений, горизонтальную проекцию дуги захвата условно разделяем на четыре части:

$$l = \sqrt{R h_0 \varepsilon} = \sqrt{150 \cdot 5,0 \cdot 0,2} = 12,2 \text{ мм,}$$

тогда для выбранной координаты $x_i = l/4 = 12,2/4 = 3,05$ мм и соответствующей толщины полосы [7]:

$$h_i = h_1 + 2 \left(R - \sqrt{R^2 - x_i^2} \right) = 4,0 + 2 \left(150 - \sqrt{150^2 - 3,05^2} \right) = 4,062 \text{ мм.}$$

Нормальное давление на участке отставания (1а):

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(0,623 \cdot 3,676 - 1,2) \left(\frac{5,0}{4,062} \right)^{3,676} + 1,2 \right] = 0,963 \sigma_T.$$

Аналогичные расчеты, сделанные для других координат очага деформации, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Контактное давление в очаге деформации при однозонной прокатке

| x_i/l | h_i , мм | Натяжение при прокатке | |
|---------|------------|---|---|
| | | заднее ($\xi_0 = 0,623$), $\bar{\sigma}_{z \text{ от}}$ | переднее ($\xi_1 = 0,258$), $\bar{\sigma}_{z \text{ оп}}$ |
| 0,0 | 4,000 | 1,000 | 0,258 |
| 1/4 | 4,062 | 0,963 | 0,292 |
| 1/2 | 4,248 | 0,866 | 0,403 |
| 3/4 | 4,559 | 0,743 | 0,619 |
| 1,0 | 5,000 | 0,623 | 1,000 |

Таким образом, решение подтверждает наличие одного участка отставания по границам очага деформации при натяжении $\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \xi_0 = 0,623$.

Среднее напряжение на контакте:

$$\bar{\sigma}_{\text{ср}}^{\xi_0=0,623, \xi_1=1,0} = \frac{\xi_0 + \sum \bar{\sigma}_{z \text{ от}} + \xi_1}{n} \sigma_T = \frac{0,623 + 0,963 + 0,866 + 0,743 + 1,0}{5} \sigma_T = 0,839 \sigma_T.$$

Распределение нормального напряжения по дуге захвата, представлено на рис. 2. Далее, при заявленных параметрах деформации, исследуем напряженное

состояние двухзонной прокатки. Для этого увеличиваем коэффициент заднего натяжения $\xi_0 = 0,7$, что обеспечит появление участка опережения.

При соотношениях

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{h_n}{h_1} = \frac{1}{1 - \varepsilon}$$

и отсутствии переднего натяжения $\xi_1 = 1,0$ относительная высота нейтрального сечения [8]:

$$Z_0 = \frac{h_n}{h_1} = \left[\frac{\sqrt{k_{\text{упр}}^2 + \frac{(\xi_0 \delta - k_{\text{упр}})(\delta + k_{\text{упр}})}{(1 - \varepsilon)^\delta} - k_{\text{упр}}}}{\xi_0 \delta - k_{\text{упр}}} \right]^{\frac{1}{\delta}} \quad (2)$$

$$= \left[\frac{\sqrt{1,2^2 + \frac{(0,7 \cdot 3,676 - 1,2)(3,676 + 1,2)}{(1 - 0,2)^{3,676}} - 1,2}}{0,7 \cdot 3,676 - 1,2} \right]^{\frac{1}{3,676}} = 1,223.$$

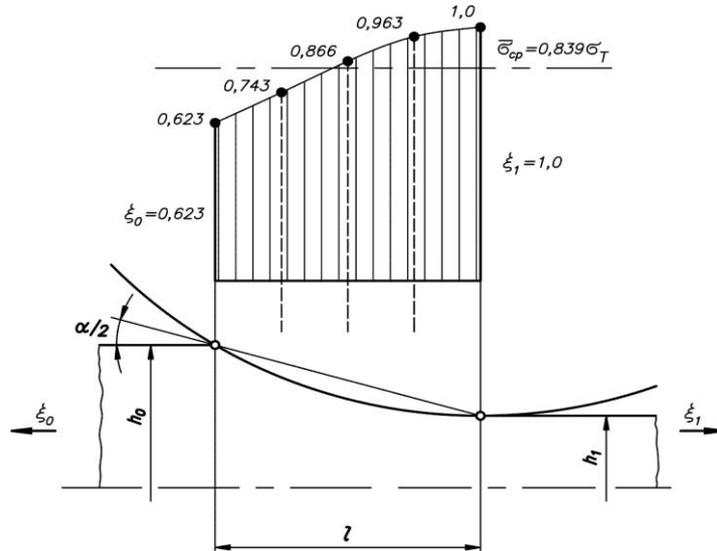


Рис. 2. Эпюра контактного давления по дуге захвата

Толщина полосы в нейтральном сечении:

$$h_n = h_0 / Z_0 = 5,0 / 1,223 = 4,088 \text{ мм.}$$

Относительное давление на границе участков отставания и опережения (1):

$$\bar{\sigma}_{z \text{ от}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(0,7 \cdot 3,676 - 1,2) \left(\frac{5,0}{4,088} \right)^{3,676} + 1,2 \right] = 1,11 \sigma_T;$$

$$\bar{\sigma}_{z \text{ оп}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(1,0 \cdot 3,676 + 1,2) \left(\frac{4,088}{4,0} \right)^{3,676} - 1,2 \right] = 1,11 \sigma_T.$$

Различие менее 1% определяет правильность выбора высоты нейтрального сечения, что позволяет перейти к расчетам силовых параметров очага деформации.

Относительное давление в нейтральном сечении устанавливаем как среднеарифметическое:

$$\bar{\sigma}_H = \frac{\bar{\sigma}_{z_{от}} + \bar{\sigma}_{z_{оп}}}{2} = \frac{1,11 + 1,11}{2} \sigma_T = 1,11 \sigma_T.$$

Среднее давление прокатки:

$$\bar{\sigma}_{cp}^{\xi_0=0,65, \xi_1=1,0} = \frac{\xi_0 + 2\bar{\sigma}_H + \xi_1}{n} = \frac{0,7 + 2 \cdot 1,11 \sigma_T + 1,0}{4} = 0,98 \sigma_T.$$

Отметим, что различие в сравнении со свободной прокаткой

$$\Delta = \frac{\bar{\sigma}_{cp}^{\xi_0=0,7, \xi_1=1,0} - \bar{\sigma}_{cp}^{\xi_0=0,623, \xi_1=1,0}}{\bar{\sigma}_{cp}^{\xi_0=0,7, \xi_1=1,0}} 100\% = \frac{0,98 - 0,839}{0,98} 100\% = 14,11\%.$$

Далее рассматриваем свободную прокатку, т.е. при отсутствии натяжения полосы $\xi_0 = \xi_1 = 1,0$, относительная высота нейтрального сечения (2) $Z_0 = 1,153$ и толщина полосы в нейтральном сечении:

$$h_H = h_0 / Z_0 = 5,0 / 1,153 = 4,337 \text{ мм.}$$

Относительное давление на границе участков отставания и опережения (1):

$$\bar{\sigma}_{z_{от}} = 1,463 \sigma_T \text{ и } \bar{\sigma}_{z_{оп}} = 1,459 \sigma_T.$$

С различием менее 1%, относительное давление в нейтральном сечении $\bar{\sigma}_i = 1,461 \sigma_T$ и среднее давление прокатки:

$$\bar{\sigma}_{cp}^{\xi_0=1,0, \xi_1=1,0} = 1,231 \sigma_T.$$

Переходим к прокатке с преобладанием переднего натяжения. Величина предельного коэффициента переднего натяжения:

$$\xi_{1 \min} = \frac{(\delta + k_{yпр})(1 - \varepsilon)^\delta - k_{yпр}}{\delta} = \frac{(3,676 + 1,2)(1 - 0,2)^{3,676} - 1,2}{3,676} = 0,258.$$

Для координаты $x_i = l/4 = 3,05$ мм и соответствующей толщине полосы $h_i = 4,062$ мм, относительное давление на участке опережения (1б):

$$\bar{\sigma}_{z_{оп}} = \frac{\sigma_T}{3,676} \left[(0,258 \cdot 3,676 + 1,2) \left(\frac{4,062}{4,0} \right)^{3,676} - 1,2 \right] = 0,292 \sigma_T.$$

Аналогичные расчеты, сделанные для других координат очага деформации, приведены в табл. 1. Среднее давление прокатки:

$$\bar{\sigma}_{cp}^{\xi_0=1,0, \xi_1=0,258} = \frac{\xi_0 + \sum \bar{\sigma}_{z_{оп}} + \xi_1}{n} \sigma_T = \frac{1,0 + 0,292 + 0,403 + 0,619 + 0,258}{5} \sigma_T = 0,514 \sigma_T.$$

При отсутствии заднего натяжения $\xi_0 = 1,0$, относительная высота нейтрального сечения [8]:

$$Z_1 = \frac{h_H}{h_1} = \left[\frac{\sqrt{k_{yпр}^2 + \frac{(\xi_1 \delta + k_{yпр})(\delta - k_{yпр})}{(1 - \varepsilon)^\delta}} - k_{yпр}}{\delta - k_{yпр}} \right]^{\frac{1}{\delta}}.$$

Ниже представлено среднее давление, рассчитанное для прокатки с различными комбинациями заднего и переднего натяжений (в случае дробного значения натяжений, поиск нейтрального сечения может осуществляться итерационным методом последовательных приближений) [9].

Вывод: Применение однозонной прокатки повышает физико-механические свойства полосы с помощью установления либо напряжения растяжения либо

Таблица 2. Среднее давление прокатки в очаге деформации

| ξ_1 | ξ_0 | | | | |
|--------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,623 |
| 1,0 | 1,231 | 1,153 | 1,069 | 0,980 | 0,839 |
| 0,9 | 1,179 | 1,103 | 1,022 | 0,936 | 0,864 |
| 0,8 | 1,127 | 1,053 | 0,974 | 0,891 | 0,821 |
| 0,7 | 1,073 | 1,001 | 0,925 | 0,845 | 0,777 |
| 0,6 | 1,017 | 0,948 | 0,875 | 0,798 | 0,733 |
| 0,5 | 0,961 | 0,894 | 0,824 | 0,750 | 0,689 |
| 0,4 | 0,902 | 0,839 | 0,771 | 0,700 | 0,642 |
| 0,3 | 0,841 | 0,781 | 0,717 | 0,650 | 0,595 |
| 0,258 | 0,514 | 0,756 | 0,694 | 0,628 | 0,574 |

напряжения сжатия, без переходов как это бывает при двухзонной прокатке. Тем самым обеспечивается наименьшее давление прокатки и разнотолщинность полосы, что повышает эксплуатационные ее характеристики.

Л и т е р а т у р а

1. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А.* Силовые и кинематические параметры очага деформации при тонколистовой прокатке // *Технология металлов*. – М.: Наука и технологии, 2013. – Вып. 3. – С. 10-13.

2. *Shuixuan Chen, Weigang Li, Xianghua Liu.* Calculation of rolling pressure distribution and force based on improved Karman equation for hot strip mill // *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 89, December 2014. – Pp. 256-263.

3. *Kazeminezhad M., Karimi Taheri A.* Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flatrolling process // *Journal of Materials Processing Technology*. – Vol. 171, Iss. 2, 20 January 2006. – Pp. 253-258.

4. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А.* Исследование механизма натяжения при прокатке // *Механика XXI века. XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов*. – Братск: БрГУ, 2012. – С. 77-82.

5. *Кохан Л.С., Шульгин А.В., Славгородская Ю.Б.* Разработка методики расчета давления при прокатке с однозонным контактом отставания // *Технология металлов*. – М.: Наука и технологии, 2015. – Вып. 7. – С. 11-15.

6. *Кохан Л.С., Алдунин В.В., Славгородская Ю.Б.* Снижение давления проката при однозонном опережении // *Технология металлов*. – М.: Наука и технологии, 2015. – Вып. 8. – С. 19-23.

7. *Кохан Л.С., Морозов Ю.А.* Интенсификация процессов прокатки // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2013. – №. 1. – С. 15-18.

8. *Кохан Л.С., Коростелев А.Б., Морозов Ю.А., Алдунин А.В., Белелюбский Б.Ф., Винокуров А.Я.* Силовые и кинематические параметры продольной листовой прокатки. – М.: МГВМИ, 2012. – 432 с.

9. *Кохан Л.С., Белелюбский Б.Ф.* Влияние соотношения переднего и заднего натяжения на уменьшение энергосиловых параметров горячей прокатки и их стабилизацию // *Технология металлов*. – М.: Наука и технологии, 2011. – Вып. 12. – С. 15-18.

References

1. *Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A.* (2013). Silovye i kinematicheskie parametry ochaga deformatsii pri tonkolistovoj prokatke, *Tekhnologiya Metallov*, M.: Nauka i tekhnologii, Vyp. 3, p. 10-13.

2. *Shuixuan Chen, Weigang Li, Xianghua Liu* (2014). Calculation of rolling pressure distribution and force based on improved Karman equation for hot strip mill, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 89, December 2014, pp. 256-263.

3. *Kazeminezhad, M, Karimi Taheri, A.* (2006). Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flatrolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, Iss. 2, 20 January 2006, pp. 253-258.

4. *Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A.* (2012). Issledovanie mekhanizma natyazheniya pri prokatke, *Mekhaniki XXI veku. XI Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem*: Sbornik dokladov, Bratsk: BrGU, pp. 77-82.

5. Kokhan, L.S., Shul'gin, A.V., Slavgorodskaya, Yu.B. (2015). Razrabotka metodiki rascheta davleniya pri prokatke s odnozonnym kontaktom otstavaniya, *Tekhnologiya Metallov*, Moscow: Nauka i tekhnologii, Vyp. 7, pp. 11-15.

6. Kokhan, L.S., Aldunin, V.V., Slavgorodskaya, Yu.B. (2015). Snizhenie davleniya prokata pri odnozonnom operezhenii, *Tekhnologiya Metallov*, Moscow: Nauka i tekhnologii, Vyp. 8, pp. 19-23.

7. Kokhan, L.S., Morozov, Yu.A. (2013). Intensifikatsiya protsessov prokatki, *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsij i Sooruzhenij*, No 1, pp. 15-18.

8. Kokhan, L.S., Korostelev, A.B., Morozov, Yu.A., Aldunin, A.V., Beleyubskii, B.F., Vinokurov, A.Ya. (2012). *Silovye i Kinematicheskie Parametry Prodol'noj Listovoj Prokatki*, M.: MGVTI, 432 p.

9. Kokhan, L.S., Beleyubskij, B.F. (2011). Vliyaniye sootnosheniya perednego i zadnego natyazheniya na umen'sheniye ehnergosilovykh parametrov goryachej prokatki i ikh stabilizatsiyu, *Tekhnologiya Metallov*, Moscow: Nauka i tekhnologii, Vyp. 12, pp. 15-18.

STRIP TENSION UNDER CONDITIONS OF ONE - AND TWO-ZONAL ROLLING

L.S. Kokhan, Yu.A. Morozov, Yu.B. Slavgorodskaya
Moscow State Machine-Building University (MAMI), Moscow

Power parameters of free rolling of a strip without tension are compared to rolling with one site of lag and an advancing on the deformation center. Dependences of a choice of limit values of back and forward tension are given.

KEY WORDS: rolling, deformation, tension, neutral section, rolling one-zonal, rolling pressure.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТРАВЛЕНИИ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННОГО ОБРАЗЦА

Ю.В. БЕЛОУСОВ, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

В статье рассмотрен экспериментально-теоретический метод определения технологических поверхностных остаточных напряжений с применением послойного травления консольно-закрепленного образца. Разработана методика расчета остаточных напряжений в поверхностных слоях материала. Показано, что предлагаемая методика расчета значительно проще по сравнению с известной и в большей степени соответствует классической, где используется образец с двумя опертыми краями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остаточные напряжения, прогиб, послойное травление, консольно-закрепленный образец.

При изготовлении деталей в их поверхностных слоях возникают остаточные напряжения. Значительные остаточные напряжения возникают после механической обработки поверхностей различных форм: точения, фрезерования, шлифования и др. Их появление связано с силовым и тепловым воздействием инструмента, что приводит к большим силовым и температурным градиентам в зоне обработки. Так, при точении растягивающие остаточные напряжения могут составлять 300...600 МПа при глубине залегания 0,1...0,2 мм, а максимальные температуры в зоне резания – 500...800°С.

Величина остаточных напряжений является важным параметром, определяющим качество изделий, влияет на работоспособность и долговечность деталей, что особенно важно при работе в условиях знакопеременных и динамических нагрузок. Поэтому большое значение имеет точность определения остаточных напряжений. Для определения остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей (напряжений первого рода) обычно используется метод, состоящий в постепенном снятии тонких слоев материала с поверхности образца, при котором замеряется его прогиб и остаточная толщина. Затем по известным зависи-

мостям рассчитывают остаточные напряжения в слоях от поверхности вглубь материала [1].

Одним из экспериментально-теоретических методов определения остаточных напряжений является метод травления консольно-закрепленного образца прямоугольного поперечного сечения, который вырезается из исследуемой детали [2]. Здесь при снятии тонких поверхностных слоев материала толщиной δ_i измеряют прогиб f_i и остаточную толщину образца h_i (рис. 1). Однако методика расчета остаточных напряжений в данном случае довольно сложна и недостаточно точна.

Так в работе [3] для расчета остаточных напряжений в консольно-закрепленном образце получена формула

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{E}{3l^2} \left[\frac{h_i^2 f_i}{\delta_i} - \sum_1^i (h_{i-1} f_{i-1}) - 3h_{i-1} \sum_1^i f_{i-1} \right]. \quad (1)$$

При ее выводе предполагалось, что образец деформируется в результате прямого изгиба и растяжения, а при определении напряжений в i – м слое необходимо учитывать напряжения изгиба и растяжения, вызванные снятием всех предыдущих слоев.

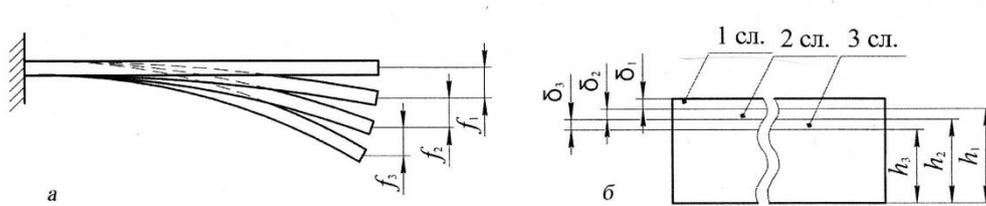


Рис. 1. Геометрические параметры, измеряемые при травлении консольно-закрепленного образца: *a* – приращение прогиба образца при снятии поверхностных слоев; *б* – изменение толщины образца.

После вырезки из детали длинного узкого образца напряженное состояние в нем становится одноосным с направлением остаточных напряжений вдоль образца. Эти напряжения постоянны по длине образца и различны по его толщине.

Неизвестные остаточные напряжения на поверхности образца $\sigma_{\text{ост}}$ считаем положительными. Удаление тонкого слоя толщиной δ с образца толщиной h вызовет деформацию остальной его части, которая была бы вызвана внецентренным приложением силы $F = \sigma_{\text{ост}} b \delta$, где b – ширина образца. После удаления тонкого слоя ось образца получит удлинение и кривизну.

Рассмотрим изгиб образца, выполненного в виде тонкого длинного стержня под действием нагрузки, приложенной с эксцентриситетом e (рис. 2). Предположим, что эксцентриситет имеется в плоскости симметрии. Тогда изгиб будет происходить в той же продольной плоскости xv , в которой действует сила F . Изгибающий момент в каком либо поперечном сечении mn будет

$$M = -F(e - f + y).$$

Момент имеет знак минус, так как при данном направлении осей стержень изогнется выпуклостью вверх.

Используя приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки, получим

$$EJ_z y'' = -F(e - f + y).$$

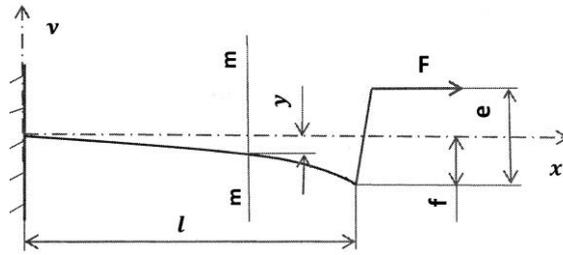


Рис. 2 Расчетная схема нагружения образца.

Введем обозначение $F/EJ_z = p^2$. Тогда

$$y'' + p^2 y = p^2(f - e).$$

Решением данного уравнения является уравнение

$$y = C_1 \sin px + C_2 \cos px + f - e.$$

Из граничных условий $(y)_{x=0} = 0$ и $(y')_{x=0} = 0$ находим $C_1 = 0$;
 $C_2 = e - f$. Тогда уравнение изогнутой оси стержня примет следующий вид

$$y = (e - f)(\cos px - 1).$$

Чтобы получить прогиб на правом конце стержня подставим $y = f$ и $x = l$:

$$f = (e - f)(\cos pl - 1).$$

Откуда
$$f = \frac{e(\cos pl - 1)}{\cos pl} \quad (f < 0).$$

При больших остаточных напряжениях в поверхностном слое величина $\cos pl$ не мала по сравнению с единицей. Стержень является гибким. Его прогиб не пропорционален силе F . Тогда

$$pl = \arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) \quad \text{и} \quad p = \frac{1}{l} \arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) = \sqrt{\frac{F}{EJ_z}}.$$

Откуда

$$F = \left[\arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) \right]^2 \frac{EJ_z}{l^2}.$$

Поскольку $J_z = \frac{b(h-\delta)^3}{12}$, то $\sigma_{ост} = \left[\arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) \right]^2 \frac{E(h-\delta)^3}{12\delta l^2}$.

При удалении с образца первого слоя

$$\frac{e_1}{e_1 - f_1} = \frac{h_1}{h_1 - 2f_1}$$

и

$$\sigma_{1ост} = \left[\arccos\left(\frac{h_1}{h_1 - 2f_1}\right) \right]^2 \frac{E h_1^3}{12\delta_1 l^2}. \quad (2)$$

После снятия первого слоя стержень изогнется. В его поверхностном слое кроме остаточных появятся дополнительные напряжения, вызванные его изгибом. Поэтому удаление второго слоя толщиной δ_2 вызовет деформацию, вызванную внецентренным приложением силы $F_2 = F_{2ост} + F_{2доп}$, где $F_{2ост} = \sigma_{2ост} b \delta_2$ – сила, вызванная равномерно распределенными во втором слое остаточными напряжениями, а $F_{2доп} = \sigma_{2доп} b \delta_2$ – сила от действия дополнительных напряжений, вызванных изгибом образца в результате снятия с него первого слоя.

Напряжения $\sigma_{2доп}$ могут быть определены по формуле

$$\sigma_{2доп} = \frac{3F_1(h_1 - 2f_1 + 2y)}{b h_1^2},$$

Напряжение $\sigma_{2\text{доп}}$ зависит от прогибов образца y , которые по его длине изменяются от 0 до f_1 . Тогда

$$F_{2\text{доп}}f_1 = \int_0^{f_1} \sigma_{2\text{доп}}(y)b \delta_2 dy = \int_0^{f_1} \frac{3F_1(h_1 - 2f_1 + 2y)\delta_2}{h_1^2} dy.$$

Откуда

$$F_{2\text{доп}} = \frac{3\sigma_{1\text{ост}}b\delta_1\delta_2(h_1 - f_1)}{h_1^2}, \quad (3)$$

а
$$F_2 = \sigma_{2\text{ост}}b\delta_2 + \frac{3\sigma_{1\text{ост}}b\delta_1\delta_2(h_1 - f_1)}{h_1^2}. \quad (4)$$

Поскольку

$$F_2 = \left[\arccos\left(\frac{h_2}{h_2 - 2f_2}\right) \right]^2 \frac{Eb h_2^3}{12l^2},$$

то
$$\sigma_{2\text{ост}} = \left[\arccos\left(\frac{h_2}{h_2 - 2f_2}\right) \right]^2 \frac{E h_2^3}{12\delta_2 l^2} - \frac{3\sigma_{1\text{ост}}\delta_1(h_1 - f_1)}{h_1^2}. \quad (5)$$

Аналогично можно получить:

$$\sigma_{3\text{ост}} = \left[\arccos\left(\frac{h_3}{h_3 - 2f_3}\right) \right]^2 \frac{E h_3^3}{12\delta_3 l^2} - \frac{3\sigma_{2\text{ост}}\delta_2(h_2 - f_2)}{h_2^2}. \quad (6)$$

Тогда общая формула для определения остаточных напряжений в i – м слое будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{i\text{ост}} = \left[\arccos\left(\frac{h_i}{h_i - 2f_i}\right) \right]^2 \frac{E h_i^3}{12\delta_i l^2} - \frac{3\sigma_{i-1\text{ост}}\delta_{i-1}(h_{i-1} - f_{i-1})}{h_{i-1}^2}. \quad (7)$$

Для иллюстрации разработанной методики выполнен расчет остаточных напряжений в образцах прямоугольного сечения по данным работы [3]. Образцы вырезали из заготовки жаропрочной стали с модулем упругости $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа. Размеры образцов: длина рабочей части $l = 80$ мм, начальная толщина $h = 2,5$ мм, ширина $b = 10$ мм. Послойное травление выполняли в электролите. Геометрические параметры измеряли с помощью цифрового индикатора. Там же выполнен расчет остаточных напряжений в соответствии с классической методикой, где используется образец с двумя опертymi краями, а толщину и прогиб измеряют в средней части образца.

Классическим методом испытывались образцы той же геометрии и вырезанные из той же заготовки. Слои также снимались химическим травлением. После снятия каждого слоя измерялись толщина h_i и прогиб f_i в средней части образца. Результаты измерения и расчета по классической методике, методике работы [3], а также по предлагаемой методике приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, расчет остаточных напряжений при травлении консольно-закрепленного образца по предлагаемой методике в большей степени соответствует классической и позволяет с большей точностью определять градиент напряжений по толщине образца. В отличие от существующей методики, здесь при определении напряжений в i – м слое нет необходимости учитывать напряжения, вызванные снятием всех предыдущих слоев. Учитываются только напряжения при снятии предыдущего и последующего слоев.

Следует заметить, что второе слагаемое в формуле (7) сильно зависит от толщины снимаемого слоя. При толщине снимаемого слоя до двадцати микрометров его доля сравнительно невелика и не превышает 2%. При увеличении толщины доля второго слагаемого может достигать до 8%. Поэтому остаточные

напряжения в удаляемом слое материала можно вычислить непосредственно через параметры только этого слоя, используя следующую формулу:

$$\sigma_{i_{ост}} = (0,92 \dots 0,98) \left[\arccos\left(\frac{h_i}{h_i - 2f_i}\right) \right]^2 \frac{E h_i^3}{12 \delta_i l^2} \quad (8)$$

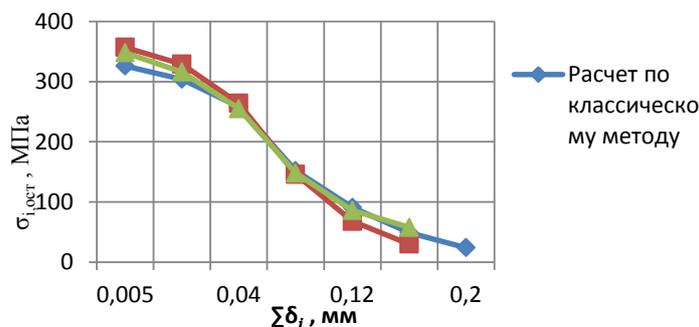


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по толщине образца ($\Sigma \sigma_i$ – суммарная толщина снятого слоя).

В формуле (8) значение числового коэффициента в скобках зависит от толщины снимаемого слоя. При малых толщинах – большее значение, при больших – меньшее. Если удаляется слой порядка нескольких микрометров, то вторым слагаемым можно вовсе пренебречь. Это может значительно упростить расчеты.

Л и т е р а т у р а

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Петров В.В., Петряев А.И., Вяземский М.К. А.с. 242466 СССР. Устройство для определения остаточных напряжений. БИ № 15 1969; опубл. 25.04.1969.
3. Олейник Б.Д., Винокуров Н.В., Нуртдинов А.С. Определение остаточных поверхностных напряжений методом травления консолюно-закрепленного образца// Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 4. – С.12-16..
4. Hoffman N.P., Stolz U. Ontransient growth of wear pattern properties// Wear. –2010. – Vol. 268. – № 7-8. – P. 886-892.

References

1. Birger, I.A., Shorr, B.F., Iosilevich, G.B. (1993). *Raschet na Prochnost Detalej Mashin: Spravochnik*, the 4th izd., pererab. i dop., Moscow: Mashinostroenie, 640 p.
2. . Petrov, V.V., Petryaev, A.I., Vyazemskij, M.K. (1969). A.s. 242466 SSSR. *Ustrojstvo dlya opredeleniya ostatochnyh napryazhenij*, BI № 15, opubl. 25.04.1969.
3. Olejnik, B.D., Vinokurov, N. V., Nurtidinov, A.S. (2015) *Opredelenie ostatochnyh poverhnostnyh napryazhenij metodom travleniya konsolno-zakreplennogo obraztsa, Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, № 4, p. 12-16.
4. Hoffman, N.P., Stolz, U. (2010). Ontransient growth of wear pattern properties, *Wear*, Vol. 268. №7-8, p. 886-892.

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY ETCHING CANTILEVERED SAMPLE

Yu.V. Belousov

Moscow State Technical University after N. Bauman, Russia

The article describes experimental-theoretical method of determining technological surface residual stresses with application of layer-by-layer etching of the cantilever-fixed sample. The developed method of calculation of residual stresses in the surface layers of the material. It is shown that the proposed calculation method is more sensitive compared to the known and practically coincides with the classic, which uses sample with two simply supported edges.

KEY WORDS: residual stresses, deflection, layer-by-layer etching, the console-fixed sample.

Остаточный ресурс эксплуатируемого объекта

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОСНОВНОГО КОРПУСА Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ» КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

К.Н. СУХИНА, *старший преподаватель кафедры СКО и НС*
В.А. ПШЕНИЧКИНА, *д.т.н., профессор, зав. кафедры СКО и НС*
ФГБОУ ВПО "Волгоградский Государственный Архитектурно-Строительный
Университет";
400087, Волгоград, ул. Двинская, д.11«а», кв.75, zhukova_kseniya@mail.ru

В статье была предложена методика определения закона изменения ресурса и прогнозирования срока службы эксплуатируемого здания, была смоделирована схема основных несущих конструкций покрытия в виде сложной резервированной системы с постоянно включенным резервом, приведены результаты определения основных числовых характеристик надежности и получено среднее время безотказной работы системы «подстропильная ферма - стропильная ферма».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остаточный ресурс; подстропильные фермы; числовые характеристики надежности; резервированные системы; среднее время безотказной работы.

Значительное увеличение межремонтных сроков зданий и сооружений промышленных предприятий, отсутствие достаточных объемов инвестиций в промышленность, привели к катастрофическому старению основных фондов промышленных предприятий и резкому снижению ресурса несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

Указанные обстоятельства ставят перед балансодержателями предприятий целый спектр задач по оптимизации процесса эксплуатации, изыскания резервов эксплуатационной пригодности основных строительных конструкций зданий и сооружений и продления их срока.

Эти задачи легко решаемы при правильной и достоверной оценке остаточного ресурса эксплуатируемого объекта. Оценка ресурса производится вероятностными методами [2] и является достаточно сложным процессом, требующем большого количества исходных данных, длительного наблюдения за эксплуатируемым объектом, регулярным проведением технического освидетельствования основных несущих конструкций (на протяжении не менее 15-20 лет) [8]. Чтобы дать достоверную оценку надежности и долговечности необходимо, в первую очередь, знать закон снижения остаточного ресурса.

Как правило, при проведении обследования конструкций зданий и сооружений и прогноза о сроке дальнейшей эксплуатации функция снижения работоспособности остается неопределимой и, в лучшем случае, может быть аппроксимирована линейной зависимостью по двум точкам (соответствующим состоянию конструкций на момент текущего и ранее проведенного обследования). Это дает достаточно грубую оценку ресурса с большой погрешностью. Для более точного определения закона изменения ресурса и прогнозируемого срока службы эксплуатируемого здания необходимо иметь данные как минимум трех обследований. При этом наиболее целесообразно за начальный момент времени принимать начало ввода в эксплуатацию объекта. Отсюда следует, что первое обследование должно проводиться в момент сдачи объекта, что современными нормами не предусмотрено. ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» гласит, что первое сплошное обследование необходимо проводить через два года после ввода объекта в эксплуатацию. Таким образом, при оценке остаточного ресурса за начальный момент времени принимается значение

теоретического ресурса, а не фактического, что не является верным, т.к. при оценке риска мы получим значения на один-два порядка выше.

Еще одним важным фактором оценки ресурса является правильный выбор схемы соединения несущих конструкций в сложную систему [5]. Очень часто общую оценку остаточного ресурса дают по результатам наиболее нагруженного или поврежденного элемента, что дает ошибочное представление о сроке службы всего здания.

Любой эксплуатируемый объект необходимо рассматривать как сложную систему, элементами которой будут являться несущие конструкции.

Надежность сложной системы определяется путем вычисления сначала вероятности безотказной работы каждого звена (при последовательно-параллельном соединении) или каждой цепи (при параллельно-последовательном соединении), а затем получают вероятность не разрушения всей системы.

Несущие конструкции зданий и сооружений могут быть представлены в виде систем общего (рис. 1) или раздельного резервирования (рис. 2).

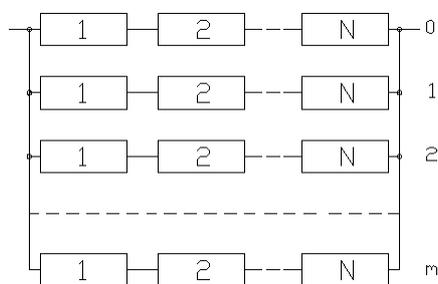


Рис. 1. Схема общего резервирования

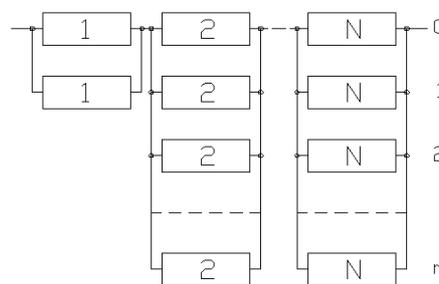


Рис. 2. Схема раздельного резервирования с постоянно включенным резервом

При общем резервировании при отказе одного элемента наступает отказ всей системы, а при раздельном или поэлементном резервировании при отказе элемента наступает отказ одной резервной группы (одного резервного соединения) [3].

При моделировании объекта в виде сложной резервированной системы следует учитывать, что она может быть описана в виде системы с постоянно включенным резервом или с замещением. При постоянно включенном резерве все элементы системы работают в одном режиме. Наступление отказа одного из элементов в такой системе может способствовать нарушению нормальной работы других элементов системы. В резервированных системах с замещением резервные элементы находятся в состоянии покоя и включаются в работу только при отказе основного элемента [6,7].

В настоящее время достоверность показателей надежности и результатов оценки остаточного ресурса эксплуатируемого объекта напрямую зависят от компетенции экспертов. Предложенный выше метод по оценке остаточного ресурса позволяет исключить человеческий фактор и уровень оснащенности лабораторной базы при проведении технического освидетельствования конструкций исследуемого объекта.

В качестве примера использования моделей резервирования и определения закона снижения функции работоспособности строительных конструкций были рассмотрены несущие конструкции покрытия основного корпуса Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ».

На первом этапе определялся закон снижения остаточного ресурса. Наблюдения за конструкциями проводились в течение 41 года. Первое обследование было проведено при вводе здания в эксплуатацию в 1964 году,

последующие – в 1989 г., 1997 г., 2005г. При каждом обследовании оценивалась фактическая несущая способность конструкций и вычислялся индекс надежности. Получен эмпирический закон снижения характеристики безопасности от времени $\beta(t)$ (кривая 1 на рис. 3), который был аппроксимирован кубической параболой [1]. На графике видно, что к 41 году ресурс основных конструкций и всего здания в целом приближается к критическому значению: $\beta(T = 41) = 2,02$. Назначенный ресурс составлял $\beta(T = 0) = 5,2$. Точка 4 на рис.3 соответствует теоретической несущей способности рассматриваемой системы.

Анализ графиков приведенных на рис.3, наглядно показывает, что оценить ресурс конструкций $T_{res}(\beta, T)$ и составить прогноз о времени их последующей безопасной эксплуатации по результатам 1-2-х обследований не представляется возможным. Так, получив значения $\beta(T = 25)$ и $\beta(T = 33)$ и приняв линейную модель скорости изменения функции $\beta(T)$ получим, что ее прогнозное значение к 41 году эксплуатации (линия 2 рис. 3) существенно расхожиться с фактическим.

Для получения адекватной оценки скорости износа конструкций чрезвычайно важно знать уровень надежности, реализованный при его возведении $\beta(T = 0)$. Использовать детерминированное расчетное значение несущей способности, как это часто принимается в инженерной практике, в задаче оценки остаточного ресурса некорректно (рис.3, кривая 3).

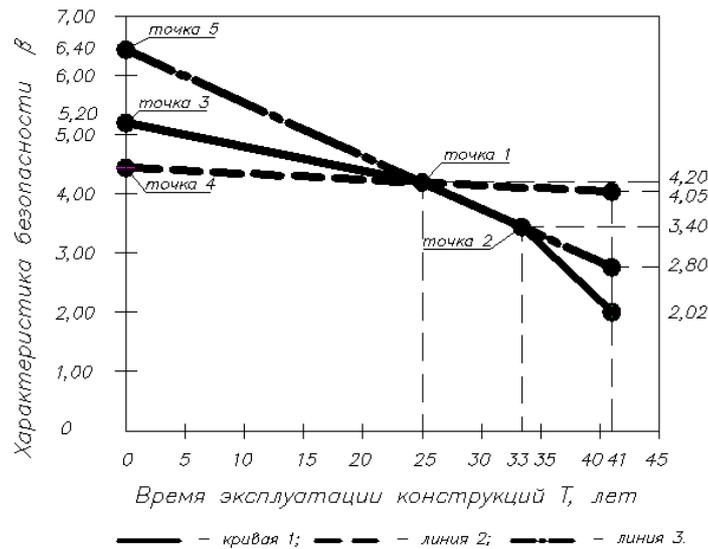


Рис. 3 Графики снижения характеристики безопасности $\beta(t)$ от времени T

Вторым этапом задавалась схема соединения подстропильных и стропильных ферм в сложную систему.

В зависимости от расположения стропильных ферм покрытия в плане корпуса Р-1 эти конструкции были разбиты на 7 типов (с учетом требований СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия»). Каждый тип в свою очередь был разбит еще на 3 категории эксплуатационного состояния (1 категория – снижение проектного расчетного сопротивления на 0%, 2 категория – на 6%, 3 категория – на 12%). Затем каждый из этих 21 вариантов, согласно чертежам, был рассчитан на заданные 4 схемы технологической узловой нагрузки. Схема расположения стропильных ферм по типам представлена на рис. 4.

Подстропильные фермы корпуса Р-1 были рассмотрены в [1]. Основываясь на теорию надежности можно сделать вывод что подсистемы «подстропильная

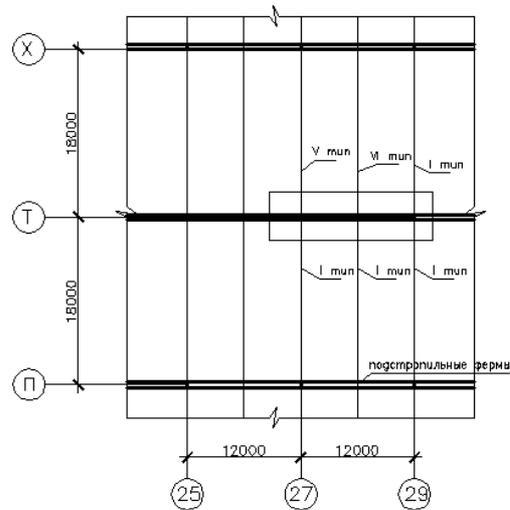


Рис. 4 Схема расположения стропильных и подстропильных ферм в зависимости от типа

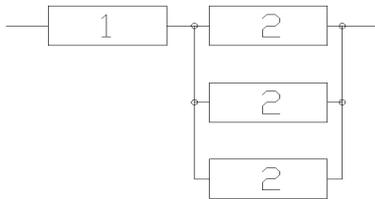


Рис. 5 Схема резервирования стропильных и подстропильных ферм

ферма» – «стропильная ферма» соединены между собой последовательно. С учетом разделения стропильных ферм на типы мы получаем систему резервирования с числом элементов $N = 2$ и кратностью резервирования $m = 2$ (рис. 5).

Таким образом, была использована схема раздельного (поэлементного) резервирования с постоянно включенным резервом.

Основные количественные характеристики при поэлементном резервировании с постоянно включенным резервом будут определяться следующим образом [4]:

- вероятность безотказной работы системы в течении времени t равна произведению вероятностей ее элементов

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = \prod_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{i=0}^m [1 - p_i(t)] \right\}, \quad (1)$$

где N – число элементов системы; m – кратность резервирования; $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -ого элемента:

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (2)$$

- частота отказов:

$$a_c(t) = -P'_c(t) = N(m+1)\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^m [1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}]^{N-1}, \quad (3)$$

где λ – среднее значение интенсивности отказа i -ого элемента:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{N}, \quad (4)$$

интенсивность отказов:

$$\lambda_c(t) = \frac{a_c(t)}{P_c(t)} = \frac{N(m+1)\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}}, \quad (5)$$

среднее время безотказной работы:

$$T_c = \int_0^{\infty} P_c(t) dt, \quad (6)$$

$$\text{или } T_c = \frac{(N-1)!}{\lambda \cdot (m+1)} \cdot \sum_{j=0}^m \frac{1}{\frac{j+1}{m+1} \cdot \left(\frac{j+1}{m+1} + 1\right) \cdot \left(\frac{j+1}{m+1} + 2\right) \dots \left(\frac{j+1}{m+1} + (N-1)\right)}. \quad (7)$$

Результаты расчетов занесены в табл. 1 и представлены графически (рис. 6-8).

Таблица 1. Значения основных числовых характеристик надежности

| Время работы системы, лет | Вероятность безотказной работы, $P_c(t)$ | Частота отказов, $a_c(t)$ | Интенсивность отказов, $\lambda_c(t)$ |
|---------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 0.997 | 0.00066 | 0.00092 |
| 20 | 0.973 | 0.0031 | 0.0045 |
| 25 | 0.945 | 0.0047 | 0.0069 |
| 30 | 0.907 | 0.0062 | 0.0095 |
| 33 | 0.879 | 0.0070 | 0.011 |
| 41 | 0.79 | 0.0086 | 0.015 |
| 50 | 0.675 | 0.0095 | 0.020 |
| 60 | 0.543 | 0.0092 | 0.024 |
| 70 | 0.420 | 0.0082 | 0.027 |
| 80 | 0.316 | 0.0067 | 0.030 |
| 90 | 0.231 | 0.0053 | 0.032 |
| 100 | 0.166 | 0.0040 | 0.034 |
| 120 | 0.084 | 0.0021 | 0.037 |
| 140 | 0.037 | 0.0010 | 0.039 |

Примечание: выделенные значения – время проводимых технических освидетельствований конструкций.

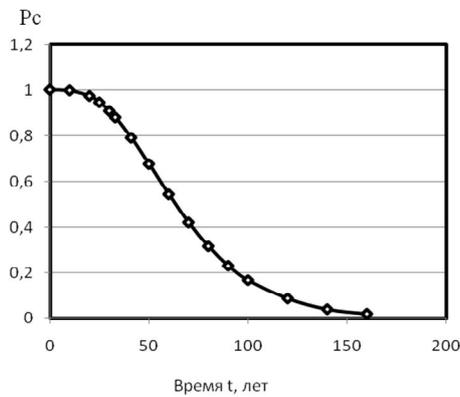


Рис. 6. Вероятность безотказной работы $P_c(t)$

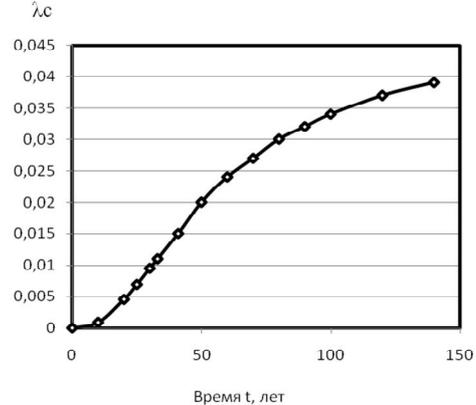


Рис. 7. Частота отказов $a_c(t)$

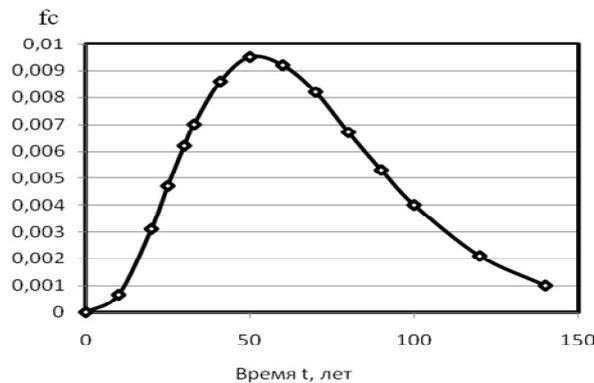


Рис. 8 Интенсивность отказов $\lambda_c(t)$

По результатам полученных данных было определено среднее время безотказной работы T_c системы «подстропильная ферма – стропильная ферма». Оно составляет около 28 лет. При этом, если бы остаточный ресурс оценивался по самому нагруженному или поврежденному элементу (а в нашем случае это подстропильные фермы), то срок службы здания T_c составил бы 47 лет.

Л и т е р а т у р а

1. Пшеничкина В.А., Сухина К.Н. Методика оценки остаточного ресурса подстропильных ферм основного корпуса Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ»: статья // Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград: ВолГАСУ, 2013.
2. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций// М.: Машиностроение, 1984. – С. 31-34
3. Острейковский В.А. Теория надежности. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2003. – С. 127-132.
4. Половко А.М. Основы теории надежности. – М.: Издательство «Наука», 1964. С. 187-191, 269-274
5. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971.
6. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986.
7. Ржанецкий А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978.
8. Лужин О.В. Обследование и испытание сооружений. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 91-150.
9. Raizer V.D. Theory of Reliability in Structural Design// Journal of Applied Mechanics Reviews, USA, 2004. – Vol.57. – No1. – Pp. 1-21.
10. Raizer V.D. Reliability of Structures. Analysis and Applications. – Backbone Publishing Company. – New York, USA, 2009. – 146 p.

References

1. Pshenichkina, V.A., Suhina, K.N. (2013). A method of evaluation of residual resource of the main body of the R-1 OAO «VOLTAYR-Prom»: statiya, Volgogr. gos. arhit.- stroit. univer, Volgograd: VolgGASU.
2. Bolotin, V.V. (1984). *Prognozirovanie Resyrsa Mashin i Konstruktziy*, Moscow: Mashinostroenie, p. 31-34.
3. Ostreikovskiy, V.A. (2003). *Teoriya Nadezhnosti*, M.: Izd-vo “Visshaya shkola”, pp.127-132.
4. Polovko, A.M. (1964). *Osnovi Teorii Nadezhnosti*, Moscow: Izd-vo “Nauka”, pp. 187-191, pp. 269-274.
5. Bolotin, V.V. (1971). *Primenenie Metodov Teorii Veroyatnostei i Teorii Nadezhnosti v Raschetah Sooruzhenii*, Moscow: “Stroiizdat”.
6. Raizer, V.D. (1986). *Metodi Teorii Nadezhnosti v Zadachah Normirovaniya Raschetnih Parametrov Stroitelnih Konstruktziy*, Moscow: “Stroiizdat”.
7. Rzanecin, A.R. (1978). *Teoriya Rascheta Stroitelnih Konstryktziy na Nadezhost*, M.: “Stroiizdat”.
8. Luzhin, O.V.(1971). *Obsledovanie i Ispitanie Sooruzheniy*, Moscow: “Stroiizdat”.
9. Raizer, V.D. (2004). Theory of Reliability in Structural Design, *Journal of Applied Mechanics Reviews*, USA, Vol. 57, No 1, pp. 1-21.
10. Raizer, V.D. (2009). Reliability of Structures. Analysis and Applications, Backbone Publishing Company, New York, USA, 146 p.

THE EVOLUTION OF RESIDIAL RESOURCE OF THE MAIN BUILDING R-1 OF “VOLTAYR-PROM” AS A COMPLEX STRUCTURE

Suhina K.N., Pshenichkina V.A.

In this paper, we have proposed a method for determining the law of variation of the resource and the prediction of the service life of the existing buildings, we have modeled the diagram of the main supporting structures of the coating in the form of a complex redundant system with a permanent source, the results of the main numerical characteristics of reliability and determined the mean time between failures of the system "post farm - truss".

KEY WORDS: residual life, farm, numerical characteristics of reliability, redundant systems, mean time between failures.

Experimental researches

PHYSIC-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE CLAYEY SOILS OF ISSABA DEPRESSION IN THE SOUTH-EAST OF BENIN

Koffi J. AGBELELE¹, agbelekoffi@yahoo.fr
Gérard GBAGUIDI AÏSSE¹, gbaguidi.gerard@yahoo.fr
Abalo P' KLA²,
Gérard DEGAN¹

¹ *Laboratory of Energetics and Mechanics Applied (LEMA), EPAC, UAC, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin.*

² *Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI) de l'Université de Lomé (UL), BP 1515 Lomé, Togo.*

The instability of soils due to the swelling phenomenon is among others at the origin of enormous damages in civil engineering works, such the deformations, the cracking, the tearing, the wear of the rotation surface and the destruction of the foundations observed at the infrastructures level (housing, socio-community centers, covered road or not). This phenomenon is a very complex and particularly threatening situation for the different construction projects, in a lot of regions of the world where these types of soils are met and at the level of which we note premature damages of the works. It urges then to make specific arrangements during the execution of infrastructures. The phenomenon described above is also present in Benin mainly in the depression of Lama.

KEY WORDS: physic-mechanical characterization, soil, clay, the south-east of Benin.

1. Introduction

The depression particularly interested some researchers who consecrated some studies.

SLANSKY M. (1950) did very precise stratigraphical studies on the coastal pond of the Dahomey at that time and detailed synthetic study of the whole coastal sedimentary pond of Togo and Dahomey. After a high number of drilled wells, he lead to the conclusion that the pond receives from the quartz and the clayey minerals where the kaolinite is very widely dominant. So as it is noted the presence of attapulgite and montmorillonite.

ADJATI A., (1986) working on the establishment of the constructive criteria of the clay of Lama Depression lead in his conclusions that the zone contains some Kaolinite, montmorillonite and illite.

The results of the chemical composition by X-ray fluorescence of the works of KIKI Yvette (2003-2004) on Onigbolo clay, located in the East depression of Lama reveal a strong proportion of silica (45 %) compared to the one the alumina (17 %), values comparable to those of illites and montmorillonites.

In 2008 HENDRIKS Kirsten (2008) studied the swelling soils of Lama Depression and concluded that all the studied soils are made of clays of Kaolinite and montmorillonite type. Her work remains however to perfect, in view of the number very restricted by points of taking in all the depression of Lama and the differences observed in the results stemming from the tests carried out.

Further to the works of HENDRIKS Kirsten, GBAGUIDI V. et al (2010) studied the swelling soils of Lama Depression. On the six points of taking made at the level of the aforementioned depression, only two points in Onigbolo and Issaba-South were realized in East of Lama. The tests allowed concluding that all the studied soils are made clays of Kaolinite and montmorillonite type and that the percentage in swelling minerals in Onigbolo is also very important with a normal activity whereas the clay obtained in Issaba has a low activity.

Although the study on all the zone of Lama depression turns out very interesting, we shall circumscribe our work only in the East zone (one of the three parts of the depression) to comprehend it better and be more precise in our results.

The present study aims at an improvement of the physico-mechanical behavior of these clayey soils and at a proposal of preventive solutions for the good behavior of the works.

2. Environment of study

The sites, object of the present study, are located in Issaba depression in East of Lama depression. According to IGUE MOUINOU, WELLER ULRICH (2000) – Geology and geomorphology of the South Benin quoted by KIKI Yvette (2003-2004). This depression of Lama is formed by a directed band WSW - ENE of maximal width 25km. It covers an area which extends from East (Pobè, Issaba, etc.) to the West (Allada, Toffo, etc.) and is estimated at a surface more than 3000km².

The depression of Lama forms a wide drill of a length of 130km and of a variable width from 5km (Tchi) to 25km (Issaba). It is divided into three zones to know the depression of Issaba in East, the depression of Ko in the center and the depression of Tchi on the West, by A. BIO YESSOUFOU, (2002).

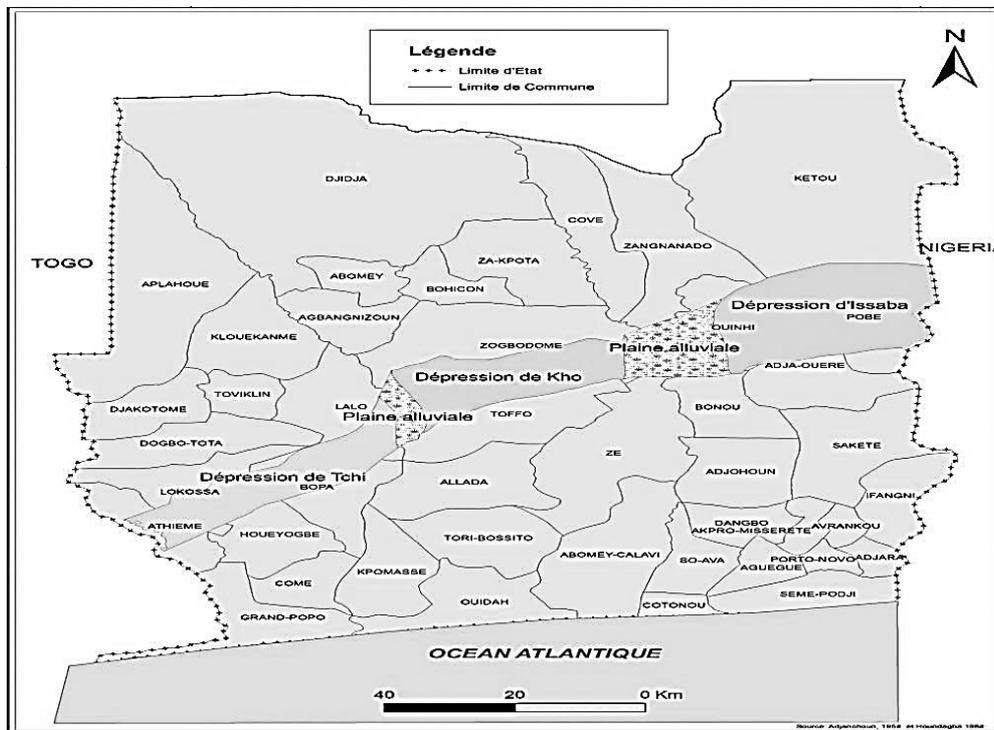


Fig. 1: Southern regional Map of Benin

3. Methodology

The methodology used then this study is at first based on the document research, then the field works finally tests of laboratory and their treatment.

The main objective of this document research is to make a bibliographical synthesis to list in general the documents approaching the studies on clays and in particular those linked to our zone of study. As regards the field works, we made at first the sampling in the environment of study, in second time located the sites of taking by a GPS to pass finally at the third time in the various takings.

So, for a better understanding of the physico-mechanical behavior of soils located in the East depression of Issaba, we realized some takings on nine (09) sites (Fig. 2). On every site, remolded and intact samples were extracted from 0m to 0,40m; 0,40m to 1,00m; 1,00m to 2,00m and from 2,00m to 3,00m of depth. The National Center of Test and Researches in Public works (NCTRPW) of Benin, the laboratory LAB-TP of Lomé in Togo and the Laboratory of the Sciences of Soil Waters and

Environment (LSSWE) of the National Institute of the Agricultural Researches of Benin (NIARB) served as surroundings for the achievement of the different and mechanical identification tests on samples. The results of these tests were the object of analysis and discussions.

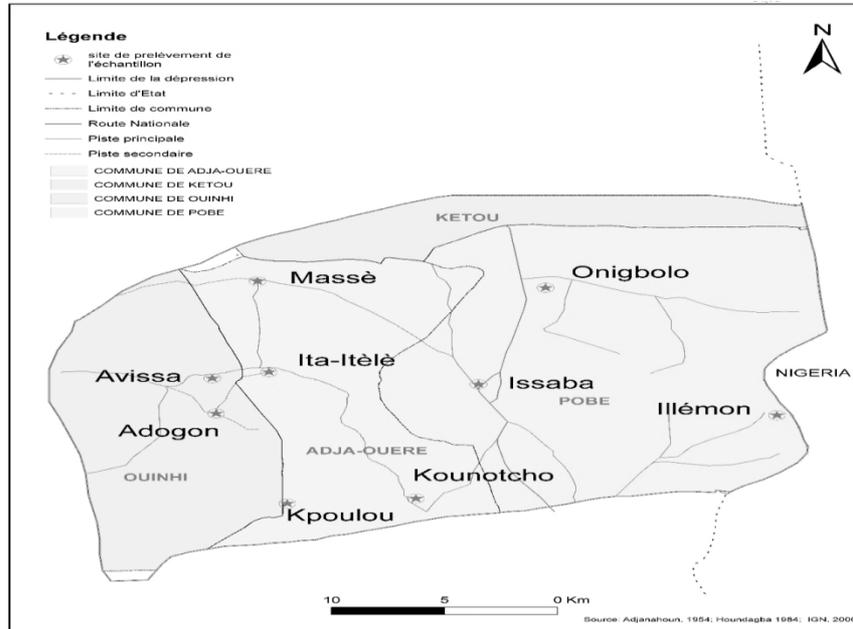


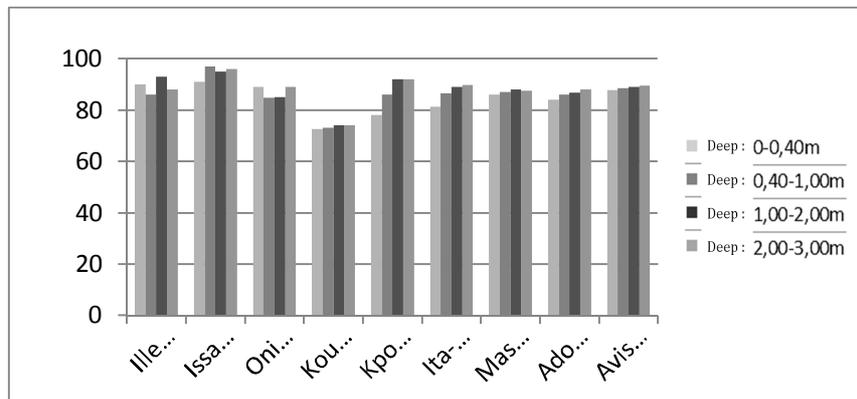
Fig. 2: Location of the taking sites

4. Results and analysis

4.1. Physical characteristics and classification

➤ Particle analysis by sieving

It is achieved according to the specification NF P 94-056 and allowed us to determine the percentage of undersize in the sieve (<80µm).

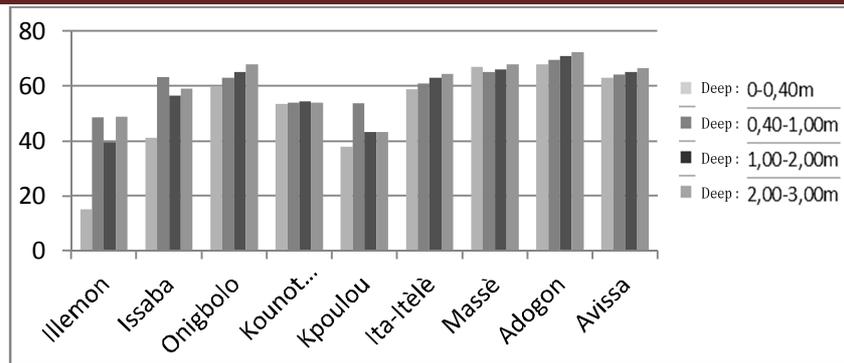


Graph 1: Undersize in the sieve 80 µm

We notice a high percentage of undersize in the sieve (<80µm) varying from 72,50 to 97 %. This analysis lets conclude, for every site, the presence until a depth of three (03) meters of a material constituted essentially of fine particles (<80µm) for every site. We shall then make a particle analysis by sedimentation for every sample to know the portion of clayey particles.

➤ Particle analysis by sedimentation

This test was led according to the specification NF P 94-057 to determine the weight distribution of the present fine particles in the samples of studied soil.

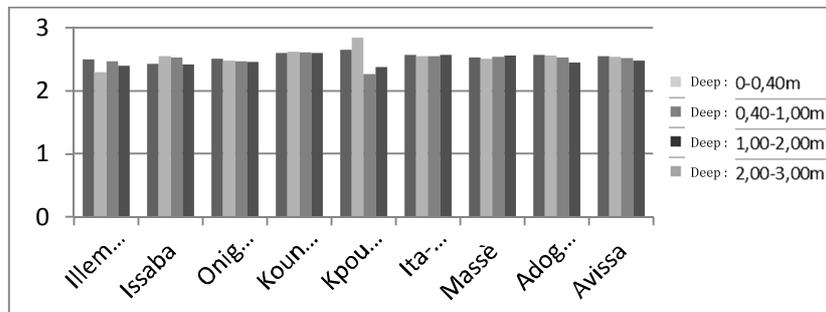


Graph 2: Undersize in the sieve 2µm

Except for the site of Illemon where the rate of clay is 15 % in the depth of 0,40 m, we note that the rate of clay for all the samples in the different depths varies from 38 to 72 %. So it draws that our samples contain clayey particles.

➤ **Specific Weights**

The specific weight of the solid grains was determined according to the French specification NFP 94 - 054. The found values are summarized on the following graph:

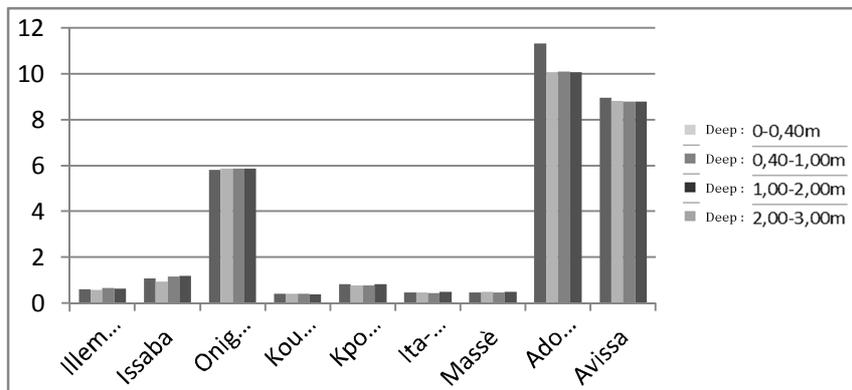


Graph 3: Specific weights

The found values are of the order of 2,27 - 2,84 and allow us to conclude that the taken samples are of clayey nature, J. LERAU, (2006).

➤ **Organic matters**

The organic matters (OM) content is the quotient of the mass of organic matters contained in a sample of ground by the total mass of solid particles. The obtained results are put down on the graph below:



Graph 4: Organic matters

Through these fluctuations, we notice a variation going from 0,39 to 11,3. So we can say that the soils of Illemon, Issaba, Kounotcho, Ita-Itèlè and Massè sites are not organic with, in Issaba, a maximal content in organic matters of $1,187 < 3$.

The soils of the other sites (Onigbolo, Adogon and Avissa) are weakly organic except the depth of 0,00m-0,40m of Adogon, fairly organic (Confer table below).

Table 1: Classification of soils in soil mechanics according to their organic matters content, (1999)

| Organic matters content(%) | Qualifying |
|----------------------------|-------------------------------|
| $C_{M0} \leq 3$ | not organic |
| $3 < C_{M0} \leq 10$ | Weakly organic |
| $10 < C_{M0} \leq 30$ | Fairly organic |
| | inpassive organic matrix |
| | insemi-fibrous organic matrix |
| $C_{M0} > 30$ | Very organic |
| | in fibrous organic matrix |
| | insemi-fibrous organic matrix |

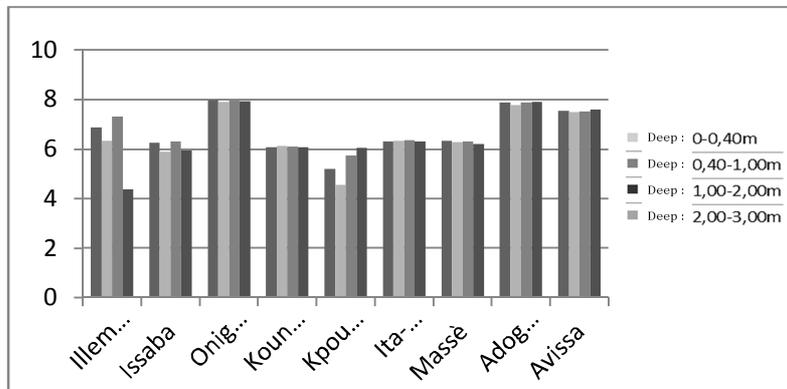
➤ **Test in the blue methylene**

According to the Guide of the Road Excavations (GRE 92) French [10], six categories of soil are defined from the value in the blue methylene.

Table 2: Value in the methylene blue according to the GRE

| Value in the methylene blue(V_{BS}) | Type of soil |
|---|------------------------------------|
| $V_{BS} < 0,1$ | insensitivesoilto water |
| $0,2 \leq V_{BS} < 1,5$ | sandsilty soil, sensitive to water |
| $1,5 \leq V_{BS} < 2,5$ | sand clayey soil, little plastic |
| $2,5 \leq V_{BS} < 6$ | silty soil of fair plasticity |
| $6 \leq V_{BS} < 8$ | clayey soil |
| $V_{BS} > 8$ | Very clayey soil |

The results of the test in the blue methylene on sites are recapitulated on the graph below.



Graph 5: Value of blue methylene

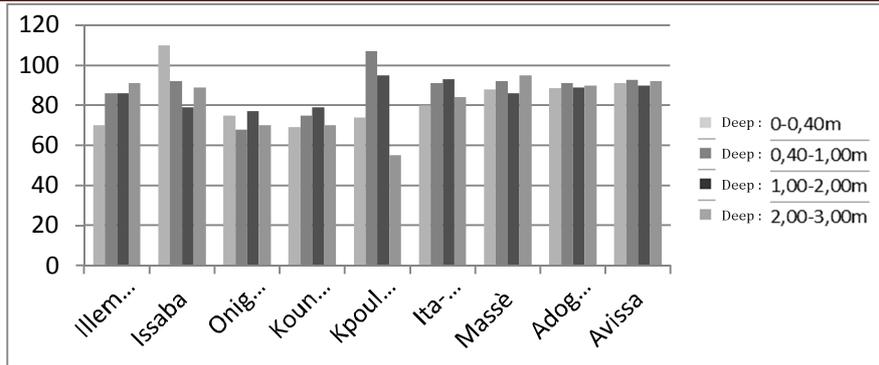
According to the board of classification according to the value of V_{BS} stemming from the French guide of excavation higher notified, we can conclude that the soils of Onigbolo, Kounotcho, Ita-Itèlè, Massè, Adogon and Avissa sites are clayey soils ($6 < V_{BS} < 8$). On the other hand the soils of Illemon, Issaba and Kpoulou sites are a mixture of clayey and silty soils with fair plasticity. Illemon for example presents some clayey grounds until a depth of 2,00m and some silt at fair plasticity from 2,00m to 3,00m.

➤ **Limits of Atterberg (NF P 94-051)**

✓ *Limits of liquidity*

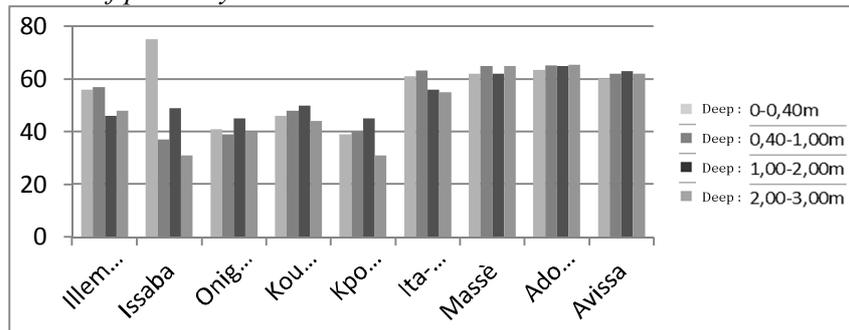
The limits of liquidity for the studied soils vary from 47 to 110 %.

As for the indexes of plasticity the obtained values go from 30 to 75 %.



Graph 6: Limits of liquidity

✓ *Index of plasticity*



Graph7: Index of plasticity

➤ **AASHTO Classification**

Table 3: AASHTO Classification (1978)

| Sites | AG | Limits | | Subgroups (AASSTO) |
|-----------|-------|--------|------|--------------------|
| | | WL | IP | |
| Illemon | 90 | 70 | 43 | A-7-6 |
| | 86 | 86 | 57 | A-7-6 |
| | 93 | 86 | 46 | A-7-5 |
| | 88 | 91 | 48 | A-7-5 |
| Issaba | 91 | 110 | 75 | A-7-5 |
| | 97 | 92 | 37 | A-7-5 |
| | 95 | 79 | 49 | A-7-5 |
| | 96 | 89 | 31 | A-7-5 |
| Onigbolo | 89 | 75 | 41 | A-7-5 |
| | 84,7 | 68 | 39 | A-7-5 |
| | 85 | 77 | 45 | A-7-5 |
| | 88,9 | 70 | 40 | A-7-5 |
| Kounotcho | 39,92 | 69 | 46 | A-7-6 |
| | 40,78 | 75 | 48 | A-7-6 |
| | 41,54 | 79 | 50 | A-7-6 |
| | 38,76 | 70 | 44 | A-7-6 |
| Kpoulou | 78 | 74 | 39 | A-7-5 |
| | 86 | 107 | 40 | A-7-5 |
| | 92 | 95 | 45 | A-7-5 |
| | 92 | 55 | 31 | A-7-6 |
| Ita-Itèlè | 81,33 | 80 | 61 | A-7-6 |
| | 86,6 | 91 | 63,2 | A-7-6 |
| | 89 | 93 | 56 | A-7-6 |
| | 89,7 | 84 | 55 | A-7-6 |
| Massè | 86 | 88 | 62 | A-7-6 |
| | 87 | 92 | 65 | A-7-6 |
| | 87 | 86 | 62 | A-7-6 |
| | 87,5 | 95 | 65 | A-7-5 |

| | | | | |
|--------|------|-------|------|-------|
| Adogon | 71 | 46,4 | 26,3 | A-7-5 |
| | 72,5 | 50 | 27 | A-7-5 |
| | 72 | 45 | 26,8 | A-7-5 |
| | 76 | 50 | 25 | A-7-5 |
| Avisa | 87,8 | 91 | 60 | A-7-6 |
| | 88,5 | 92,7 | 62 | A-7-6 |
| | 89 | 89,78 | 63 | A-7-6 |
| | 89,5 | 92 | 62 | A-7-6 |

It emerges from this classification that all the taken samples are clayey soils of A-7-5 and A-7-6.

➤ **Casagrande's chart of Plasticity**

Casagrande suggested a simplified approach, based on the limits of liquidity and plasticity. This chart of plasticity allows having so much relevant information as the mineralogical identification tests, (1991).

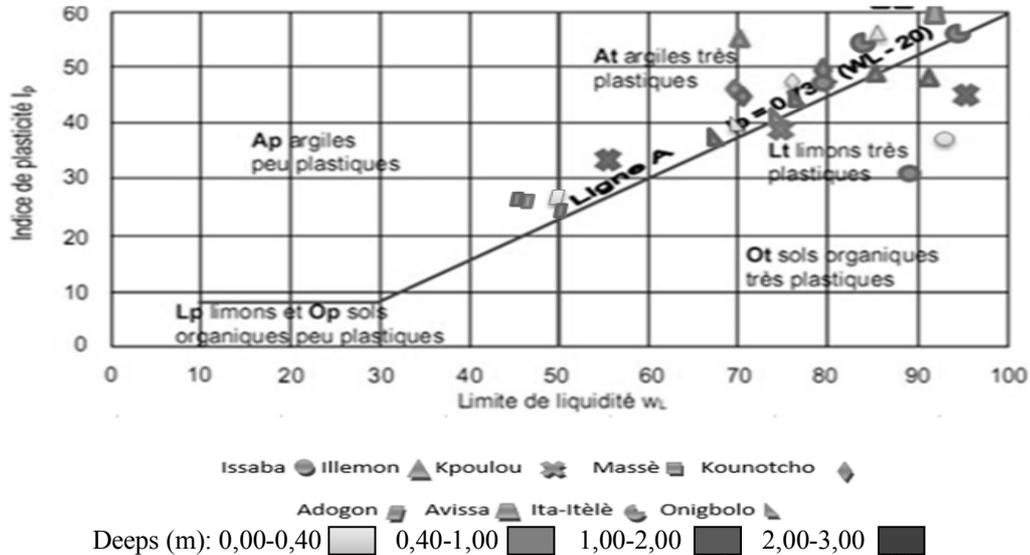


Fig. 3: Casagrande's chart of plasticity (1953)

According to this chart, the soils of Onigbolo, Massè, Ita-Itèlè, Kounotcho sites, Adogon and Avisa are over the Line A; so they are some very plastic clay. The soils of Issaba, Illemon and Kpoulou sites are a mixture of very plastic of clay and silt because these samples are both above and below the line A. That confirms the results of the value of blue methylene.

➤ **Activity of the clay**

The activity coefficient «A» of an aggregate (known on the name of SKEMPTON coefficient) was defined in 1953 by SKEMPTON, as being the quotient of the index of plasticity (IP) of this aggregate in its content in elements of diameters lower than 2 micrometers ($2\mu\text{m}$) «the clayey fraction (FA)», (1981).

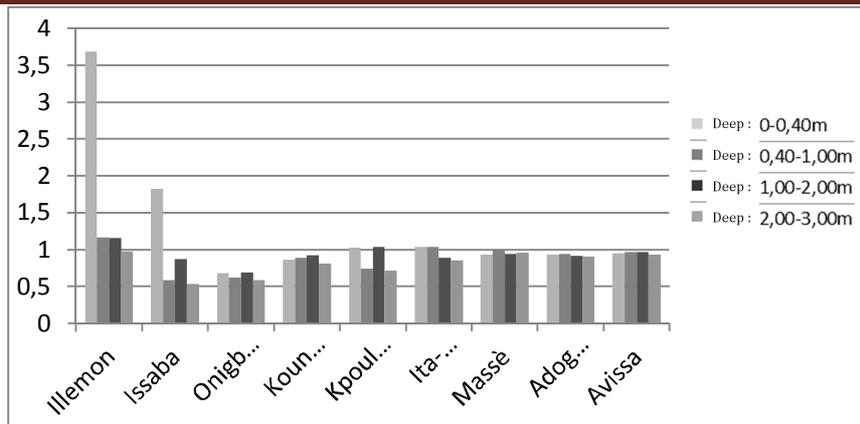
$$A = \frac{I_p}{\%_{<2\mu\text{m}}}, \quad (1)$$

where A is the activity of the aggregate and IP is the index of plasticity.

Table 4: Activities of the main families of clays (Skempton, 1953)

| Activity Ac | Type of sol |
|-------------|-----------------|
| 0,50 – 0,75 | inactive soil |
| 0,75 – 1,25 | normal soil |
| 1,25 – 2,00 | activesoil |
| >2 | Very activesoil |

The diagram below presents the results of the activity of the clay out of various studied takings.



Graph 8: Activity of the clay

It draws from these results that all the soils taken until the depths of 3,00mm are inactive ($A_c < 0,75$) except for the level from 0 to 0,40 m for the one of Issaba where the clay is active and very active for Illèmon always for the same thickness.

➤ Potential of swelling

Table 5: Classification of SANGLERAT, (1981).

| Potential of swelling | IP (%) |
|-----------------------|---------|
| Weak | <15 |
| Fair | 15 – 25 |
| High | 25 – 55 |
| Very high | >55 |

By referring to the Graph 7, the values of IP are between 31 and 75 %. According to Guy SANGLERAT's chart, we can conclude that studied clays have a «High to Very High» potential of swelling.

Table 6: Classification of the swelling of the different soils studied according to the G. SANGLERAT Chart, (1981).

| Sites | DEPTHS (m) | | | |
|----------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,00-0,40 | 0,40-1,00 | 1,00-2,00 | 2,00-3,00 |
| | Type of swelling | | | |
| Illemon | Very High | | High | |
| Issaba | Very High | High | | |
| Onigbolo, Kounotcho, Kpoulou | High | | | |
| Ita-Itèlè, Massè, Adogon, Avissa | Very High | | | |

4.2. Mechanical characteristics

➤ Direct shearing

From the results of the direct shearing test for the soils of the studied sites, we made a classification of these lastones according to the permissible stress.

Table 7: Classification of soils following the permissible stress

| Sites | DEPTHS (m) | | | |
|----------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,00-0,40 | 0,40-1,00 | 1,00-2,00 | 2,00-3,00 |
| | Contrainte Admissible du Sol | | | |
| Illemon | VeryWeak | Weak | Weak | Weak |
| Issaba, Onigbolo | Weak | | | |
| Kounotcho | VeryWeak | VeryWeak | VeryWeak | VeryWeak |
| Kpoulou | Weak | | | VeryWeak |
| Ita-Itèlè, Massè, Adogon, Avissa | VeryWeak | | | |

➤ **Oedometrical tests**

The results obtained during the oedometrical tests are recapitulated in the table below.

Table 8: Summary of the results of the oedometrical tests

| Sites | Depth (m) | Index of compression Cc | Index of voids | Index of swelling Cg | $\frac{c_c}{1 + e_0}$ |
|-----------|-----------|-------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|
| Illemon | 0,00-0,40 | 0,820 | 0,840 | 0,060 | 0,470 |
| | 0,40-1,00 | 0,352 | 1,028 | 0,028 | 0,170 |
| | 1,00-2,00 | 0,359 | 0,902 | 0,027 | 0,190 |
| | 2,00-3,00 | 0,357 | 0,856 | 0,026 | 0,192 |
| Issaba | 0,00-0,40 | 0,345 | 0,757 | 0,032 | 0,196 |
| | 0,40-1,00 | 0,355 | 0,590 | 0,026 | 0,160 |
| | 1,00-2,00 | 0,327 | 0,860 | 0,022 | 0,176 |
| Onigbolo | 0,00-0,40 | 0,340 | 0,970 | 0,020 | 0,172 |
| | 0,00-0,40 | 0,560 | 1,103 | 0,017 | 0,270 |
| | 0,40-1,00 | 0,490 | 1,087 | 0,018 | 0,235 |
| Kounotcho | 1,00-2,00 | 0,590 | 1,098 | 0,016 | 0,281 |
| | 2,00-3,00 | 0,480 | 0,980 | 0,0165 | 0,240 |
| | 0,00-0,40 | 0,270 | 0,857 | 0,024 | 0,140 |
| | 0,40-1,00 | 0,310 | 0,744 | 0,023 | 0,180 |
| Kpoulou | 1,00-2,00 | 0,320 | 0,783 | 0,024 | 0,180 |
| | 2,00-3,00 | 0,290 | 0,731 | 0,023 | 0,167 |
| | 0,00-0,40 | 0,375 | 1,020 | 0,023 | 0,185 |
| | 0,40-1,00 | 0,358 | 0,906 | 0,022 | 0,170 |
| Ita-Itèlè | 1,00-2,00 | 0,363 | 0,957 | 0,024 | 0,185 |
| | 2,00-3,00 | 0,416 | 0,912 | 0,021 | 0,220 |
| | 0,00-0,40 | 0,280 | 0,933 | 0,012 | 0,145 |
| | 0,40-1,00 | 0,270 | 0,945 | 0,013 | 0,140 |
| Massè | 1,00-2,00 | 0,250 | 0,892 | 0,014 | 0,132 |
| | 2,00-3,00 | 0,270 | 0,905 | 0,011 | 0,142 |
| | 0,00-0,40 | 0,290 | 0,975 | 0,012 | 0,147 |
| | 0,40-1,00 | 0,280 | 0,912 | 0,013 | 0,146 |
| Adogon | 1,00-2,00 | 0,260 | 0,868 | 0,015 | 0,140 |
| | 2,00-3,00 | 0,280 | 0,857 | 0,010 | 0,150 |
| | 0,00-0,40 | 0,310 | 1,430 | 0,0092 | 0,127 |
| | 0,40-1,00 | 0,290 | 1,162 | 0,009 | 0,134 |
| Avisa | 1,00-2,00 | 0,330 | 1,510 | 0,009 | 0,131 |
| | 2,00-3,00 | 0,350 | 1,340 | 0,0094 | 0,150 |
| | 0,00-0,40 | 0,280 | 1,523 | 0,0047 | 0,110 |
| | 0,40-1,00 | 0,285 | 1,433 | 0,0051 | 0,120 |
| Avisa | 1,00-2,00 | 0,300 | 1,311 | 0,005 | 0,130 |
| | 2,00-3,00 | 0,297 | 0,980 | 0,0053 | 0,150 |

- **Index of compression Cc**

Table 9: Index of compression of some clayey minerals by COSTET and SANGLERAT, (1981)

| | |
|-----------------------------|------------------|
| Sand | 0,01 < Cc < 0,1 |
| Stiff clay (kaolinite) | 0,1 < Cc < 0,25 |
| Fair clay (illite) | 0,25 < Cc < 0,80 |
| Soft clay (montmorillonite) | 0,80 < Cc < 2,5 |

From the *Table 9*, we can deduct that the soils by nature “fair clay (illite)” in Kpoulou, Issaba, Massè, Kounotcho, Adogon, Avissa, Ita-Itèlè and Onigbolo. But in Illemon the soil is not uniform. From 0 to 0,40m we meet some soft clay (montmorillonite) " and from 0,40m to 3,00m the soil is by nature “fair clay (illite)”.

- Formula of PHILIPPONAT $\frac{c_c}{1+e_0}$, (1997)

Table 12: Pathological risk according to $\frac{c_c}{1+e_0}$

| $\frac{c_c}{1+e_0}$ | Pathological risk |
|------------------------------------|-------------------|
| $< 0,015$ | Weak |
| $0,015 < \frac{c_c}{1+e_0} < 0,05$ | Fair |
| $0,05 < \frac{c_c}{1+e_0} < 0,2$ | Big |
| $> 0,2$ | Very Big |

Table 13: Board translating the pathological risk of studied soils following the formula of PHILIPPONAT, (1997)

| Sites | DEPTHS (m) | | | |
|---|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,00-0,40 | 0,40-1,00 | 1,00-2,00 | 2,00-3,00 |
| | Risque pathologique | | | |
| Illemon | Very Big | Big | | |
| Issaba, Kounotcho, Ita-Itèlè, Massè, Adogon, Avissa | Big | | | |
| Onigbolo | Very Big | | | |
| Kpoulou | Big | | | Very Big |

5. Proposals for a good behavior(performance) of the works

The studied soils being some clay constituted essentially by Montmorillonite and by illite with a high and very high swelling so causing a «Big – Very Big» pathological risk of the beach, we suggest:

➤ **For the road constructions**

A general scraping of the soil is at least at a thickness of 40 cm.

Replace the part of the soils scraped by selected materials whose characteristics answer the specifications allowing a good behaviour of the road.

Isolate the layer of foundation of the soil support by materials as geotextiles and geogrids to avoid the water rise.

➤ **For the buildings**

As regards the light structures, in view of the character swelling some clay with a pressure of variable swell in all the studied depths, we recommend a scraping of the clay soil and its replacement by adequate materials. So, the foundations will be anchored in a ground bistratum: it's a system of blob foundations resting on a backfilling in pulverulent materials (granular sand) which will act as mattress distributor of stresses. For the big constructions, we recommend the design of the deep foundations on piles to anchor on the good soil. The maximum of depth reached for the takings within the context of this study being only three (03) meters, an analysis of soils in bigger depth in proving necessary to appreciate better their natures in order to make the best options.

6. Conclusion

The present study reported in this paper allowed us to draw from conclusions about the soils of our sites of research.

The soils of all the studied sites except Illemon are constituted by silt and by clay of the family of illite and montmorillonite, having a potential of swelling from «high»

to «very high» with an activity of the clay varying from «inactive» to «very active». In Illemon, the soil is only constituted by clay of the family of montmorillonites, whose activity is «active» with a «Very High» potential of swelling.

The mechanical tests confirmed our conclusions made from the identification tests. Kpoulou, Massè, Ita-Itèlè, Avissa and Kounotcho are characterized by a soil of «fair» clay. The soils of Illemon, Issaba contains some «soft» and «fair» clay. On the other hand the soils of Adognon and Onigbolo contain some «fair» clay. As for the pathological risk, according to the formula of Philipponnat, the studied grounds have a pathological risk going from «big» to «very big».

Bibliographical references

[1]- M. SLANSKY, (1962). Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du DAHOMEY et du TOGO. Technip, Paris, France.

[2]- A. ADJATI, (1986). Etablissement des critères constructifs de l'argile de la Lama : Contribution à l'étude du gonflement. Thèse d'agrégation de l'Enseignement Supérieur de l'Université Libre de Bruxelles, Belgique.

[3]- Y. KIKI, (2003 – 2004). Contribution à la mise au point de méthodes de stabilisation des sols gonflants : application aux sols argileux de la région de la Lama (Bénin). Thèse de doctorat de 3ème cycle de l'Ecole Supérieure Polytechnique de THIES.

[4]- K. HENDRIKS, (2008). Etude et analyse des sols gonflants au Bénin. Travail de fin d'études en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Civil des Constructions. Université de Liège. Université d'Abomey-Calavi - Laboratoire d'Essais et de Recherche en Génie Civil.

[5]- V. GBAGUIDI et al, (2010). Etude du phénomène de gonflement des sols argileux du bassin sédimentaire côtier au Bénin.

[6]- I. Mouinou, W. Ulrich, (2000). Géologie et géomorphologie du sud Bénin.

[7]- A. BIO YESSOUFOU, (2002). Analyse organisationnelle de la fédération béninoise de football : stratégie des acteurs.

[8]- J. LERAU, (2006). Géotechnique, Tome 2.

[9]- P. REIFFSTECK, (1999). Les sols gonflants en génie-civil. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

[10]- Le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92).

[11]- R. HOLTZ, W. KOVACS et T. SHEAHAN, (1991). Introduction à la géotechnique, Montréal, Editions de l'Ecole polytechnique de Montréal.

[12]- O. COUSSY, (1981). Mécaniques des milieux poreux, Editions Technip, Paris.

[13]- J. COSTET et G. SANGLERAT, (1981). Cours pratique de mécanique des sols, Tome 1: Plasticité et calcul des tassements, 3ème édition, Dunod, Paris.

[14]- G. PHILIPPONNAT et B. HUBERT, (1997). Fondations et ouvrages en terre, 3ème édition, Eyrolles, Paris.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ РАЙОНА ИССАБА НА ЮГО-ВОСТОКЕ БЕНИНА

Коффи Дж. АГБЕЛЕЛЕ*, Жерар ГБАГУИДИ АЙССЕ*, Абало П. КЛА, Жерар ДЕГАН
* EPAC, UAC, Cotonou, Bénin, ** ENSI de l'Université de Lomé, Lomé, Togo.

Неустойчивость грунта под основанием из-за выпучивания, как и многие другие явления, вызывает огромные разрушения в строительных работах из-за деформирования, растрескивания, образования трещин и разрушения фундаментов инфраструктур (жилищных, социально-общественных центров, дорог асфальтированных или не асфальтированных).

Это явление очень сложное и особенно вызывает угрожающие ситуации для различных строительных проектов во многих регионах мира, где эти типы основания существуют и на уровне которых отмечаются преждевременные нарушения работ. Эти явления требуют введения конкретных мероприятий по ходу выполнения строительных работ. Описанное выше явление присутствует в Бенине в основном в ложбине Лама.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: физико-механические характеристики, грунт, глина, юго-восток Бенина.

**РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ
СЕКЦИИ № 28 БЕТОННОЙ ПЛОТИНЫ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС**

П.В. ШЕСТОПАЛОВ, инженер

АО «ИГХолдинг Рус», 123317, Москва, Пресненская наб., д.6, стр.2, оф.43-10,
info@ighrus.com

В соответствии с разработанной автором методикой расчетного определения физико-механических характеристик оснований бетонных сооружений на основе конечно-элементных моделей выполнены расчетные исследования деформативных и прочностных характеристик скального основания секции №28 бетонной плотины Богучанской ГЭС с учетом данных натурных наблюдений за осадками основания (в том числе его приконтактных зон).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: секция бетонной плотины Богучанской ГЭС, верховой и низовой столбы, скальное основание, приконтактная зона, деформативные и прочностные физико-механические характеристики, натурные наблюдения, осадки, конечно-элементные модели.

Бетонная плотина Богучанской ГЭС длиной 757 м состоит из 16-ти глухих (общей длиной 287 м), 9-ти стационарных (общей длиной 270 м) и 8-ми водосбросных секций (общей длиной 200 м). Принятая для иллюстрации подхода автора к расчетным исследованиям скального основания секция №28 имеет высоту 97 м, ширину 22 м [1].

Основание секции №28 расположено целиком в области гидротермального изменения долеритов с пониженными деформационными характеристиками. Непосредственно под подошвой секции на глубину 12...20 м залегают долериты зоны B_1^T с проектным модулем деформации 3000 МПа. Как это будет показано далее, в пределах этого слоя непосредственно в приконтактной области (на основе сопоставления результатов расчётов с натурными данными) выделена зона основания B_1^{TK} толщиной 2...3 м с чрезвычайно низкими модулями деформации 100...200 МПа. Ниже зоны B_1^T располагается зона B_2^T с модулем деформации 6000 МПа.

Для измерения относительных осадок скального основания в приконтактной зоне под верховым столбом I секции № 28 установлены два ряда деформометров: в первом ряду №№ 228с21 и 228с22* с базой 2 м и №№ 228с51* и 228с52 с базой 5 м; во втором ряду №№ 228с23 и 228с24 с базой 2 м и №№ 228с53 и 228с54 с базой 5 м; под низовым столбом IV установлены деформометры №№ 228с25* и 228с26 с базой 2 м и №№ 228с55* и 228с56 с базой 5 м (деформометры, помеченные знаком *, не работают к настоящему времени).

Наблюдения за осадками основания секции №28 проводятся с помощью глубинных реперов (на основе деформометров ПЛПС-10), заложенных на глубине 10, 20, 30 и 50 м. Наблюдения за осадками тела секции №28 ведутся по двум потолочным маркам (ПМ-28-1, ПМ-28-2), расположенным в цементационной галерее.

Конструкция секции №28 с основанием и схемой размещения приборов представлена на рис.1.

В верховом столбе (28-I) секции №28 при напряжениях по подошве первого столба 2,31 МПа осадки приконтактной зоны основания изменяются в диапазоне от 3,40 мм (228 с23) до 5,00 мм (228с54), а в низовом столбе (28-IV) они составляют от 3,56 мм (228с26) до 4,54 мм (228с55).

Результаты натурных наблюдений за осадками основания секции №28 бетонной плотины представлены графически на рис. 2.

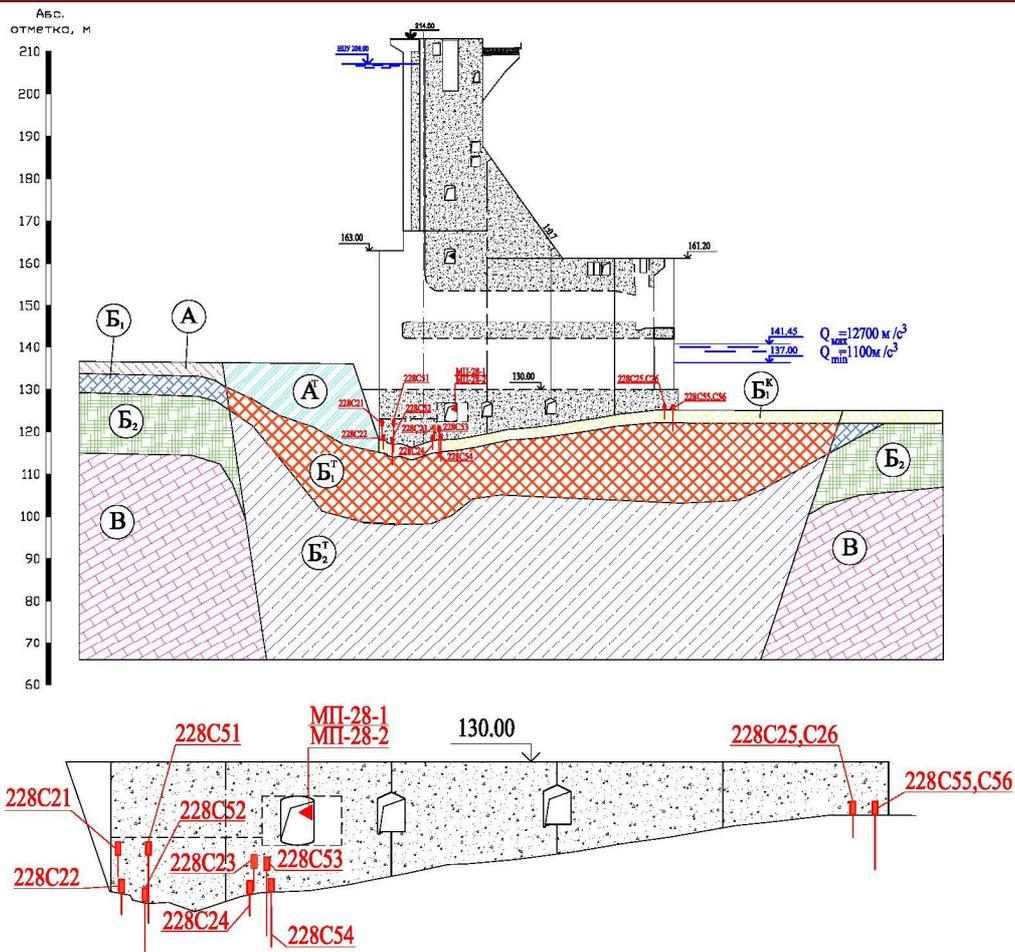


Рис. 1. Конструкция секции №28 бетонной плотины Богучанской ГЭС в сечении вдоль потока

Расчетное уточнение физико-механических характеристик основания секции №28 проводилось итерационным путем для шестнадцати характерных этапов возведения сооружения на основе соответствующих конечно-элементных моделей секции №28 совместно с основанием.

Разработка конечно-элементных моделей секции №28 совместно с основанием проводилась с учетом опыта моделирования бетонных сооружений с основаниями [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Результаты расчета для 16-го этапа возведения секции №28 (по состоянию на начало 2012 г.) приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Глубина залегания слоя, м | Модули деформации (МПа) в конце 16-го этапа | | |
|---------------------------|---|---------|--------------------------|
| | В верхней части основания | | В нижней части основания |
| | Створ 1 | Створ 2 | |
| 0-2 | 2615 | 976 | 1187 |
| 2-5 | 2893 | 1084 | 1318 |
| 5-20 | 4523 | 4523 | 4523 |
| 20-35 | 7453 | 7453 | 7453 |

Следует подчеркнуть, что приращения осадок секции №28 на каждом из расчетных этапов и их суммарные значения хорошо согласуются с натурными данными.

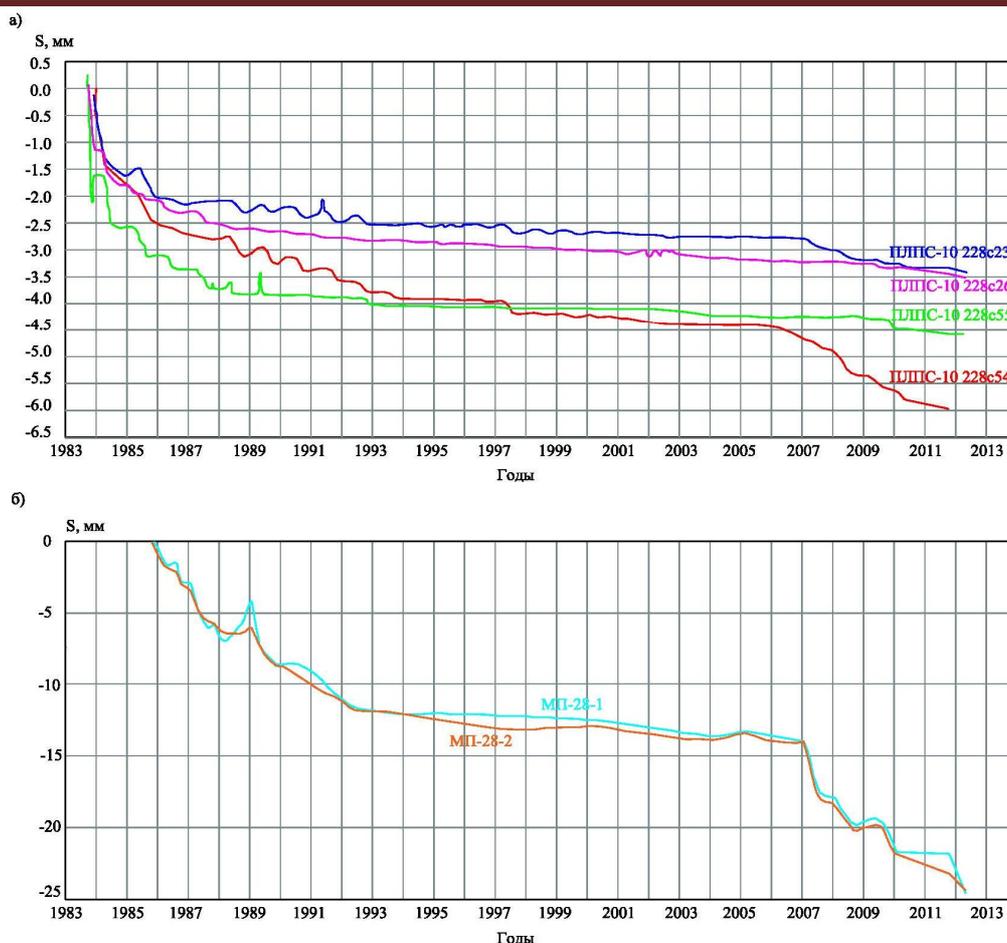


Рис. 2. Результаты натуральных наблюдений за осадками основания секции №28 бетонной плотины: а) данные натуральных измерений относительных осадок основания по деформометрам с базой 2 м и 5 м (верховая и низовая сторона); б) геодезические измерения общих осадок основания

В АО «Институт Гидропроект» на основе многочисленных натуральных экспериментов по определению деформативных и прочностных характеристик скальных пород разработана методика определения параметров R_{cm} , C и $tg\varphi$ по величине модуля деформации приконтактного слоя.

С использованием полученных значений модулей деформации были определены прочностные характеристики грунтов основания секции №28 бетонной плотины Богучанской ГЭС (табл. 2).

Таблица 2 Модули деформации приконтактного слоя E , призмная прочность R_{cm} , сдвиговые параметры C и $tg\varphi$

| №№ п/п | Зона подошвы секции №28 | Деформативные и прочностные характеристики скальной породы приконтактного слоя | | | |
|--------|-------------------------|--|----------------|-------------|-----------|
| | | E , МПа | R_{cm} , МПа | $tg\varphi$ | C , МПа |
| 1 | Верховая (створ 1) | 2615 | 2,615 | 1,163 | 0,471 |
| 2 | Верховая (створ 2) | 976 | 0,976 | 0,945 | 0,213 |
| 3 | Низовая | 1187 | 1,187 | 0,985 | 0,248 |

Полученные результаты определения физико-механических характеристик скального основания секции №28 бетонной плотины Богучанской ГЭС были использованы при проведении поверочных расчетов прочности и устойчивости данной секции.

Л и т е р а т у р а

1. *Volynchikov, A.V.* Structural aspects of the Boguchany project on the Angara river // *The International Journal on Hydropower & Dams*. – 2007. – Iss. 3 (No 3). – Pp.58-62.
2. *Шестопалов П.В.* Расчетные исследования для уточнения физико- механических характеристик скального основания на основе данных натурных наблюдений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2013. – №1. – С. 66-73.
3. *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б., Неведов А.В.* Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений // *Гидротехническое строительство*. – 1999. – №8/9. – С. 22-28.
4. *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Гребенщиков В.П., Цыбаков В.А., Неведов А.В., Катанов А.Д., Пономарев Д.И.* Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС // В сб. «Бетонные и железобетонные гидротехнические сооружения»: Известия ВНИИГ. – 2005. – Том 244. – С. 227-233.
5. *Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Шакарс И.Э., Новиков С.П.* Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния левого блока здания Плявиньской ГЭС с учетом данных натурных наблюдений // *Гидротехническое строительство*. – 1998. – №2. – С. 47-53.
6. *Xu, L.* Stress and Deformation Analysis for the Concrete Face Rockfill Dam of Wuyue Pumped Storage Power Station / L. Xu, Z. Shen, F. Yang, X. Gu // *Materials of ASCE*. – 2012. – Pp. 986-995.
7. *Moraes, R.* Numerical codes used to model failure in large fractured scale and jointed rock slopes in hydropower projects / R. Moraes // *6-th Int. Conference on Dam Engineering*. Lisbon. – 2011. – Pp. 445-451.

R e f e r e n c e s

1. *Volynchikov, AV* (2007). Structural aspects of the Boguchany project on the Angara river. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Iss.3 (No.3), pp.58-62.
2. *Shestopalov, PV* (2013). Raschetnye issledovaniya dlya utochneniya fiziko-mekhanicheskikh karakteristik skalnogo osnovaniya na osnove dannih naturnih nabluydeniy. *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktziy i Sooruzheniy*, №1, pp. 66-73.
3. *Rubin, OD, Lisichkin, SE, Lyapin, OB, Nefedov, AV* (1999). Issledovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh energeticheskikh sooruzheniy. *Gidrotechnicheskoe Stroitel'stvo*, №8/9, pp. 22-28.
4. *Rubin, OD, Lisichkin, SE, Grebenshchikov, VP, Zcibakov, VA, Nefedov, AV, Katanov, AD, Ponomarev, DI.* (2005). Raschetnoe obosnovanie resheniy po obespecheniyu nad'ozhnosti konstruktsiy vodosbrosa № 2 betonnoy plotini Boguchanskoy GES, Sb. «*Betonnye i Zhelezobetonnye Gidrotechnicheskie Sooruzheniya*», Izv. VNIIG, Vol. 244, pp. 227-233.
5. *Lisichkin, SE, Rubin, OD, Shakars, IE, Novikov, SP* (1998). Raschetnaya ozenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya levogo bloka zdaniya Plyavinskoy GES s uch'otom dannih naturnih nabl'udeniya, *Gidrotechnicheskoe Stroitel'stvo*, № 2, pp.22-28.
6. *Xu, L., Shen, Z., Yang, F., Gu, X.* (2012). Stress and Deformation Analysis for the Concrete Face Rockfill Dam of Wuyue Pumped Storage Power Station, *Materials of ASCE*, pp. 986-995.
7. *Moraes, R.* (2011). Numerical codes used to model failure in large fractured scale and jointed rock slopes in hydropower projects, *6-th Int. Conference on Dam Engineering*, Lisbon, pp. 445-451.

SETTLEMENT DEFINITION OF PHYSICAL-AND-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCK FOUNDATIONS OF THE SECTION № 28 OF THE CONCRETE DAM OF BOGUCHANSKAYA HPS

P.V. Shestopalov

JSC "IGHolding Rus", Moscow, Russia

In accordance with the author method of calculation of the physical-and-mechanical characteristics of the foundations of concrete structures based on finite element models, computational studies of deformability and strength characteristics of rock foundation of section №28 of Boguchanskaya HPS concrete dam based on foundation subsidence field data (including its near-contact zones) were performed.

KEY WORDS: section of Boguchanskaya HPS, concrete dam, upstream and downstream poles, bedrock, near-contact zone, deformability and strength, physical-and-mechanical characteristics, field observations, subsidence, finite element model.

Требования к оформлению статей в журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений»

Текст статьи подготавливается в виде компьютерной, готовой к изготовлению печатной матрицы, распечатки и варианта на электронном носителе. Текст распечатки должен быть четким. Формат текста с размером по вертикали 23 см и по горизонтали 13,5 см. Текст размещается в середине листа формата А4.

Поля рукописи должны быть следующие:

верхние и нижнее по 3,4 см; справа и слева по 3, 8 см.

Отступ первой строки абзаца – 0,75 см.

Текст подготавливается в системе *Word*, размер шрифта 11 пунктов. Шрифт *Times New Roman*, межстрочный интервал *одинарный*. Текст оформляется по аналогии с представленными в сборнике статьями. Обязательно использовать *автоматический перенос*.

Заголовок **СТРОЧНЫМИ** буквами, жирным шрифтом, центрируется (в заголовке не должно быть переносов).

После пропуска одной строки следует И.О. ФАМИЛИЯ, *ученая степень, ученое звание* (или *инженер, аспирант, студент*) (курсивом) автора. Соавтор аналогично.

С новой строки: *Организация* (место работы, курсивом). Если соавторы из разных организаций против каждого автора из одной организации ставится одна звездочка *, против авторов (соавторов) из другой организации – две звездочки ** (и т.д.). После последовательного перечисления всех авторов статьи (каждого с новой строки) следуют наименования организаций, предваренные * или ** (и т.д.) звездочками. Затем с новой строки следует полный почтовый и электронный адрес автора.

После пропуска одной строки следует *краткая аннотация статьи* (курсив, 10 пт) объемом не более 6-8 строк, затем после пропуска одной строки идут ключевые слова, и, наконец, после пропуска одной строки идет основной текст.

После основного текста следует: Л и т е р а т у р а (центрируется)

Далее идет пронумерованный список цитируемой литературы (Full –10). Авторы выделяются курсивом. Затем с новой строки следует: R e f e r e n c e s (центрируется) и повторяется цитируемая литература на английском языке или на родном языке, но латинскими буквами (Full – 9).

В заключительной части статьи приводятся **НАЗВАНИЕ** статьи (строчными жирными буквами), ф.и.о. авторов (централизуются) и перевод аннотации статьи на иностранный, предпочтительнее, английский язык. Затем с новой строки идут ключевые слова (KEY WORDS: ...) на английском языке.

Рисунки оформляются в тексте статьи предпочтительно средствами *Word* или других графических средств. Рисунки, оформленные отдельно от текста, должны полностью занимать страницу в пределах формата текста, на листе А4. Рисунки, выполненные чертежными средствами (тушью или черными чернилами), должны быть аккуратными с четкими надписями. Рисунки и надписи на них должны быть единым целым (сгруппированы) и не распадаться при их перемещении. Рисунки отделяются от текста на 6 пт.

Формулы в тексте статьи готовятся с помощью редактора формул *Microsoft equation* с установленными параметрами:

Full –11, Subscript/Suhtscript – 9, Sub- Subscript/Suhtscript – 7,

Symbol – 14, Subsymbol – 10.

Математика (функции) – латинские символы курсивом, греческие символы – прямым шрифтом. Между формулами и сверху, снизу от текста интервал 3 *pt*.

Номера страниц проставляются карандашом в левом нижнем углу страницы. Последняя страница предоставляется в двух экземплярах, второй экземпляр подписывается авторами статьи.

Аспирантам и соискателям желательно приложить к статье отзыв научного руководителя или специалиста по тематике статьи из организации, где выполняется работа.

Редакция имеет право снимать с публикации статьи, не отвечающие указанным требованиям, или, если на статью поступят два отрицательных отзыва рецензентов, или членов редакционного совета, или членов редколлегии журнала.