

ПРОЧНОСТЬ РАСТЯНУТЫХ БОЛТОВ СОЕДИНЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Болтовые соединения строительных конструкций, воспринимающие продольные растягивающие усилия, рассчитываются в предположении их центрального растяжения [1,2]. Опыт эксплуатации болтовых соединений показывает, что опорные участки болтов таких соединений часто работают на растяжение с изгибом. При этом к возникновению деформаций изгиба приводят как неточности изготовления головки болта, гайки и корпусной детали (стержня) относительно оси резьбы, так и небольшие взаимные перемещения соединяемых элементов (фланцев и т.д.). В работе [3] показано, что вследствие технологических факторов (односторонняя неполная формовка опорной поверхности головки в процессе горячей высадки, перекося смежной опорной поверхности, несоосность элементов соединения и т.д.) угол перекося поверхности опирания головки узловых болтов структурных конструкций типа «МарХИ» изменяется от 0 до 5°. Смещения элементов фланцевого соединения строительных конструкций приводят к появлению дополнительных изгибающих напряжений в опорных участках болта и могут вызывать обрыв болта [4]. Различные исследователи показали, что реальные условия работы резьбовых соединений наиболее близко к действительности отображает их расчетно-экспериментальная модель как растянуто-изогнутого элемента [5-7,11]. Было установлено, что определять конструктивную прочность болтов только с использованием стандартных механических характеристик материала (предел текучести, временное сопротивление) болта явно недостаточно. Для этого необходимо учитывать комплексное действие его формы, особенностей материала, условий нагружения, чувствительность к надрезу и другие технологические и эксплуатационные факторы. Испытания болтов на растяжение с перекосям (внецентренное растяжение) впервые были предложены Маттесом в 1938г. [5]. Последующие испытания болтов из различных материалов выявили особенности проявления конструктивной прочности внецентренно растянутых болтов, применяемых в основном для машиностроительных конструкций [8]. Отдельные исследования работоспособности растянутых болтов строительных конструкций также показали сложный характер проявления конструктивной прочности этих болтов [3,9]. Исследования ЦНИИСК им.Кучеренко [9] позволили сформулировать одно из основных условий надежной работы болта в строительной конструкции, а именно: наличие достаточной пластичности болта, работающего на растяжение, особенно при низких температурах или динамических воздействиях. При этом было показано, что пластичность болта в основном определяется технологией его изготовления и последующей термообработкой. Существующая практика определения механических свойств болтов и их испытаний регламентируется ГОСТ 1759.4-87, согласно которому контроль механических свойств болтов следует проводить по программам А или В. Программа А применяется для испытания болтов со специальной конструкцией головки или стержня, менее прочной, чем резьбовой участок, а также образцов, полученных механической обработкой, и изделий, площадь сечения стержня которых меньше номинальной площади сечения резьбового участка (т.е. в основном для образцов, вырезанных из болтов). Программа В применяется для испытаний болтов, винтов и шпилек с диаметром резьбы более 4 мм и длиной

резьбы не менее 2,5 номинального диаметра резьбы и является предпочтительной для всех изделий и обязательной для изделий с разрывной нагрузкой менее 500кН (50тс). По программе В проводят следующие виды испытаний болтов: на растяжение; измерения твердости; испытания пробной нагрузкой; на разрыв на косо́й шайбе; на прочность соединения головки со стержнем; на обезуглероживание; на повторный отпуск; контроль качества поверхности. Пластичность болта по ГОСТ 1759.4-87 можно оценивать по данным определения относительного удлинения δ_5 на растягиваемых цилиндрических пятикратных образцах, выточенных из исследуемых болтов. В статье [9] показано, что такой способ оценки пластичности болта не дает удовлетворительных результатов, так как при токарном изготовлении образца из болта устраняется влияние конструктивных и технологических факторов, существенно сказывающихся на пластичности болта.

Однако, анализ существующей практики определения механических характеристик болтов строительных конструкций показывает, что до сих пор встречаются случаи отклонения от требований ГОСТ 1759.4-87, особенно на стадиях проектирования и изготовления новых конструкций, расследования аварий с разрывом болтов, проектирования и изготовления конструкций усиления зданий и сооружений с использованием резьбовых соединений. Так, при анализе аварий с разрывом болтов, вместо испытаний по ГОСТ 1759.4-87 иногда пытаются ограничиться лишь металловедческими исследованиями материала болтов (анализ элементного состава, исследование структуры материала; испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 и т.д.). Такие исследования являются несомненно полезными при металловедческом анализе материала болтов, выяснении технологических особенностей его изготовления и обработки, макро- и микроскопическом исследовании дефектности материала в областях, примыкающих к излому, но эти исследования не позволяют, как правило, рассчитать или определить сопротивляемость болта (резьбового соединения) как изделия конкретным воздействиям и нагрузкам. Поэтому для работающих на растяжение болтов для строительных конструкций испытания по программе В согласно ГОСТ 1759.4-87 являются решающими.

Целью настоящего исследования является получение и анализ экспериментальных данных по прочностным характеристикам работающих на растяжение болтов строительных конструкций, их составу и анализ полученных данных для выработки рекомендаций по их изготовлению, расчету, эксплуатации и анализу их работоспособности.

Для экспериментальных исследований принимались болты, удовлетворяющие требованиям СНиП II-23-81* и СНиП 2.05.03-84, и наиболее часто применяемые в работающих на растяжение болтовых соединениях элементов конструкций зданий и сооружений. Часть исследуемых болтов (серия 1) изготавливались в процессе токарной обработки заготовок, другие болты (серия 2) испытывались в состоянии поставки (болты изготавливались по технологии фирмы «Peiner»). Химсостав и механические характеристики материалов экспериментальных болтов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики материала экспериментальных образцов №№ 2,8,13

№ п.п	Диаметр стержня (резьбы) болта, мм	Способ изготовления	Химический*) состав, %					Механические**) свойства		
			С ***)	Si ***)	Mn ***)	Cr ***)	Ni ***)	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_b , МПа	δ , %
2	20,1 (17,5)	«Peiner»	32	9	89	135	До 20	866,1	1048, 6	6
8	19,7 (18,0)	Резание	43	30	66	10	До 20	497,5	604,4	7
13	19,8 (17,3)	Резание	49	35	60	13	До 20	571,4	682,6	6

Примечания. *)- элементный состав исследовался на атомно-эмиссионном спектрометре «ЭМАС-200Д»; **) – испытание на растяжение проводилось по ГОСТ 1497-84 на универсальной испытательной машине «Instron 1195(Англия)»; ***) – увеличенное в 100раз;

Испытания обеих серий болтов проводились на машине EU-100 с использованием специально разработанных захватов. Болты испытывались с обеспечением трех типов опирания гаек на плоскость нагружения: 0;6;10 градусов и с различными скоростями нагружения. Нагружение при 6 и 10 градусах осуществлялось через косые шайбы. Измерения геометрических параметров образцов до и после испытания проводились штангенциркулем. Для измерения температурного поля поверхности болтов в стадии предразрушения и в момент разрыва использовался термограф «Иртис-200И».

Данные механических испытаний болтов сведены в таблицу 2, изломы образцов показаны на рис.1.

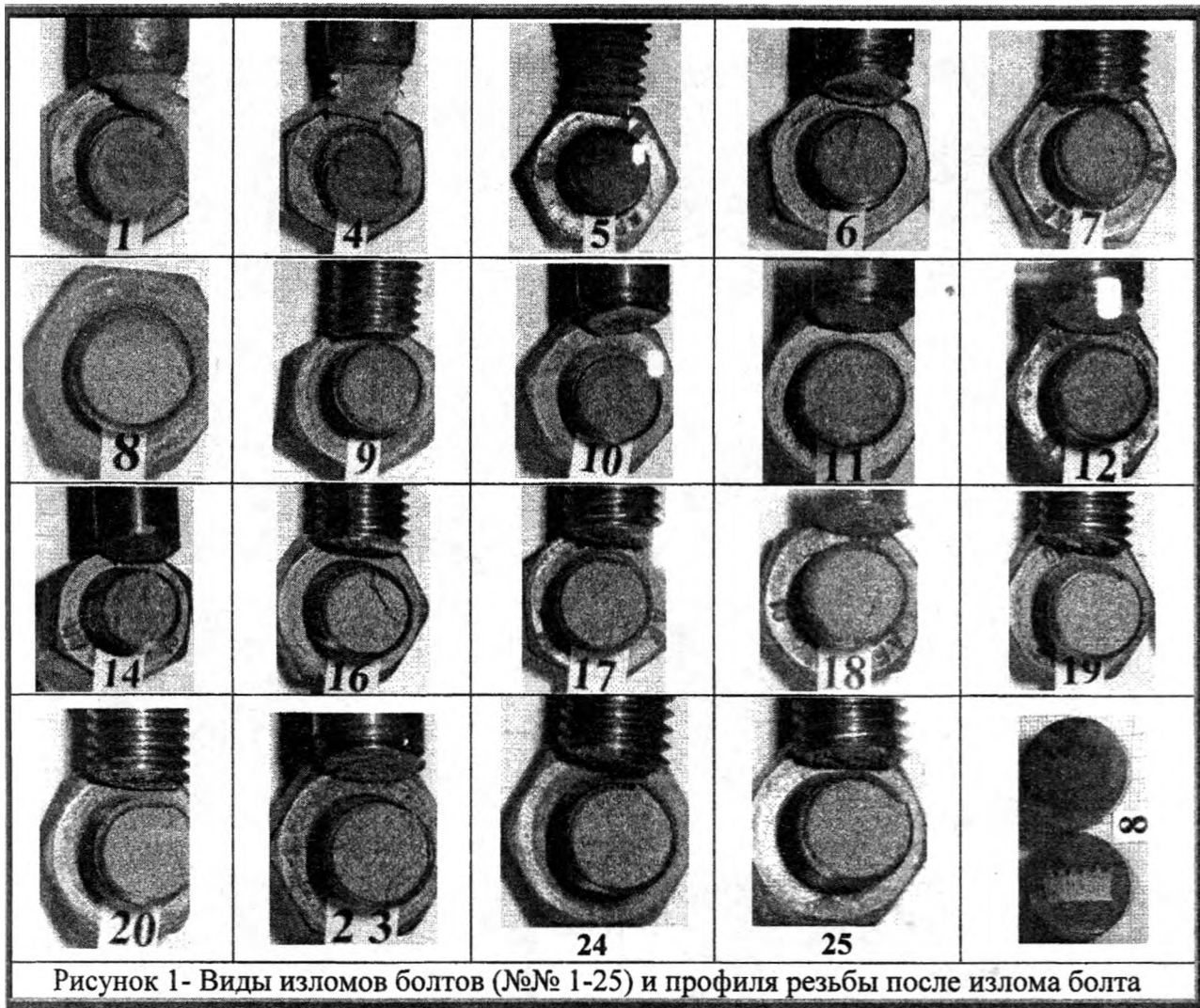
Таблица 2. Характеристики испытанных болтов

№ серии-болта	Диаметр, мм		Скорость нагружения болта, кН/сек	Разрушающая нагрузка, кН	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение стержня болта/сужение резьбы, %	Примечания (угол, очаг зарождения трещины)
	стержня	резьбы					
1-1	19,4	17,2	100	281	1210,0	0,7/2,6	0°, резьба
1-2	18,9	17,0	-	274 ^{*)}	1207,8	-/-	0°, резьба
1-3	19,0	17,5	-	212 ^{**)}	881,8	-/-	10°, резьба
1-4	19,3	17,0	300	279	1229,8	0,4/11,8	0°, резьба
1-5	20,0	17,0	-	274	1207,8	0,4/10,6	0°, резьба
2-6	19,8	17,4	0,2	172	757,5	3,0/9,2	0°, резьба
2-7	20,1	17,5	0,2	154	670,5	-/9,4	6°, резьба
2-8	19,5	17,4	0,2	154	678,2	-/7,5	10°, резьба
2-9	20,0	17,5	0,2	144	626,9	-/7,7	10°, резьба
2-10	19,9	17,0	10	156	719,7	-/4,1	0°, резьба
2-11	19,8	17,5	100	164	714,0	-/0,9	0°, резьба
2-12	19,8	17,3	50	175	779,6	-/4,0	0°, резьба
2-13	19,7	18,0	10	170	699,6	-/-	0°, резьба
2-14	19,7	17,5	8,5	162	705,3	-/3,7	6°, резьба
2-15	19,4	17,0	0,1	164	756,6	0,7/3,8	0°, резьба
2-16	19,6	17,2	1	156	703,1	2,5/4,7	10°, резьба
2-17	19,8	17,5	1	151	657,4	1,5/7,7	6°, резьба
2-18	19,8	17,3	50	145	646,0	1,4/5,5	10°, резьба
2-19	19,7	17,5	10	151	657,4	3,8/5,3	10°, резьба
2-20	19,9	17,8	30	171	719,6	2,9/8,7	6°, резьба
2-21	19,7	17,7	90	124	527,7	-/-	10°, резьба
2-22	19,7	17,5	9	176	766,3	-/-	6°, резьба
2-23	19,5	17,3	0,2	174	775,2	-/5,2	0°, резьба
2-24	19,8	17,7	20	172	732,0	-/8,2	10°, резьба
2-25	19,0	16,4	0,2	157	778,3	-/0,6	10°, резьба
Примечания . ^{*)} -срез резьбы; ^{**)} -срыв резьбы.							

Из таблицы 2 следует, что временное сопротивление болтов существенно зависит от величины угла между плоскостью опорной поверхности гайки и плоскостью нагружения и от величин скоростей нагружения. Так, при статическом нагружении применение косых шайб со скосом в (6-10)⁰ приводит к уменьшению временного сопротивления на (12,5-9)% (здесь и далее сравнение ведется с данными испытаний при статическом нагружении и 0-вом угле). Увеличение скорости нагружения до 10кН/сек приводит к снижению временного сопротивления на (3,6-9)%. При росте скорости нагружения до 50 кН/сек временное сопротивление при 0-м угле возрастает на 2%, а при 10⁰-на 15% уменьшается. При испытании со скоростью

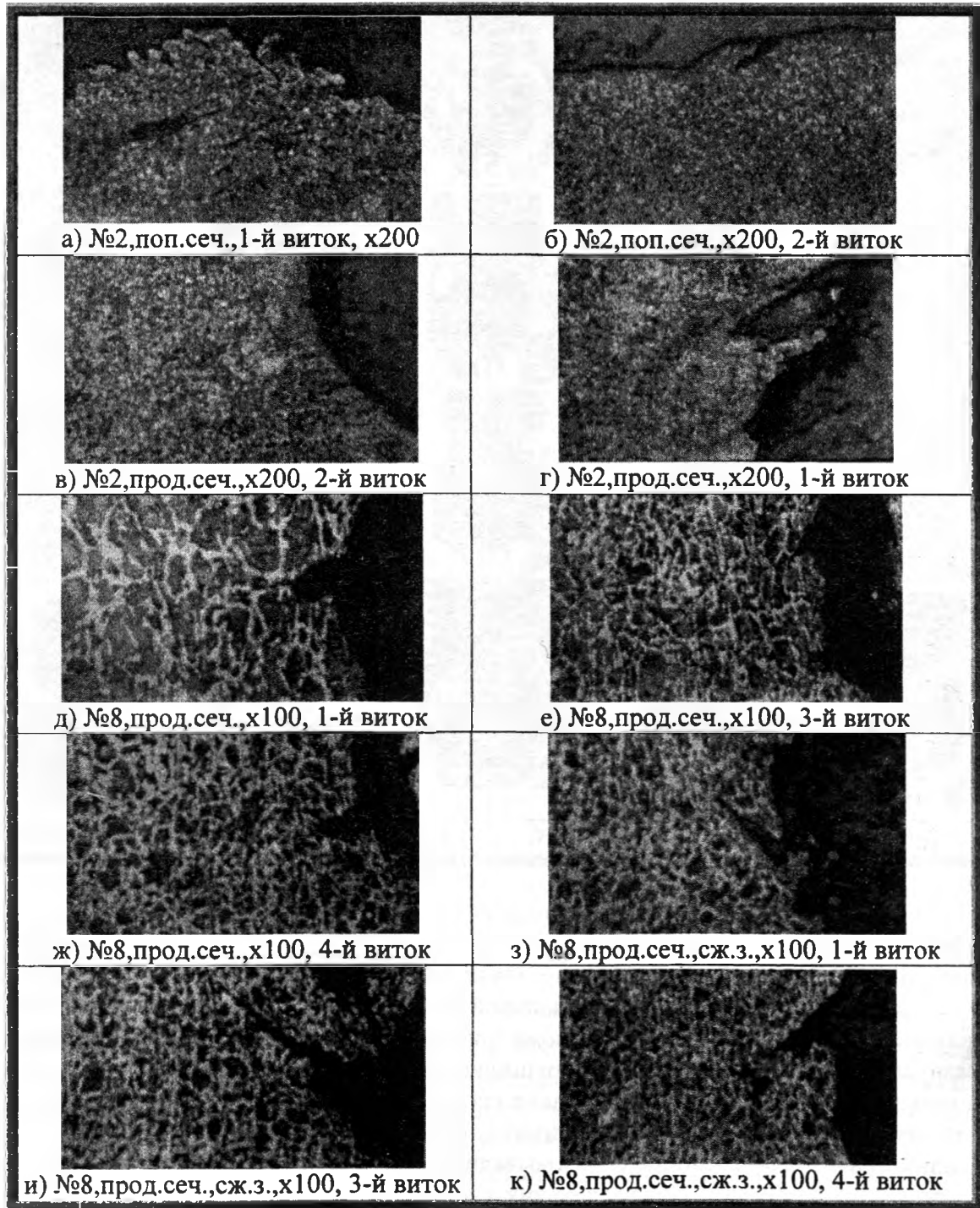
нагрузки 100кН/сек происходит уменьшение прочности: при 0-м угле - на 6%; при 10° - на 31%.

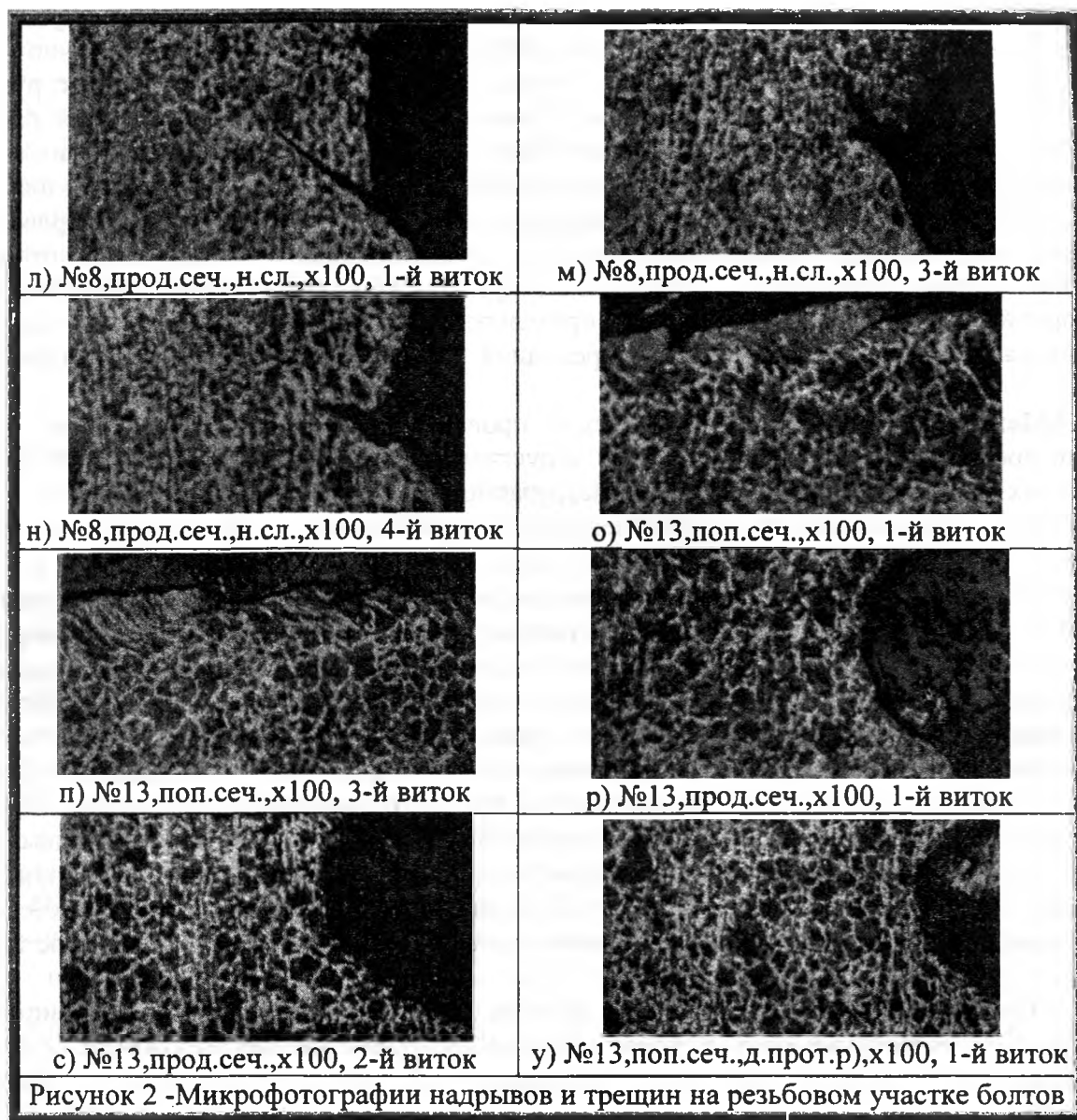
Остаточное удлинение стержня болта (от головки до начала резьбовой части) небольшое. В стадии предразрушения и разрыва все удлинение стержня обеспечивалось участком резьбы между гайкой и началом нарезки резьбы. Наибольшее удлинение резьбовой части наблюдалось у образцов 1-й серии. Образцы 2-й серии разрушались хрупко с незначительным удлинением резьбовой части. Более чувствительной к действию скорости нагружения и перекосу является относительное сужение в месте излома.



Изломы болтов 1-й серии происходили сколом, а изломы болтов 2-й серии имеют все признаки хрупкого разрушения. Макроскопически изломы образцов 1-й серии характеризуются матовой, шероховатой поверхностью. На изломах образцов №№ 6-10 хорошо просматриваются две зоны: зародившиеся в начальной стадии нагружения серповидные трещины (вида «луны» в разных фазах) и зоны долома (рис.1). Долом происходил по механизму хрупкого разрушения. Остальные болты разрушились хрупко с неразличимой невооруженным глазом серповидной трещиной. При больших скоростях нагружения «луна» была молодой, а при статическом нагружении «луна» на изломе образцов становилась более полной (рис.1). Серповидные начальные трещины образовывались только в образцах нагружаемых статически (образцы 6-10 и другие). При маленьких скоростях нагружения серповидные трещины охватывали значительную часть площади поперечного сечения прежде чем их длина становилась критической. При действии статической нагрузки они развивались с равномерной скоростью. Видимо, со снижением скорости приложения нагрузки время их роста будет воз-

растать, а процесс разрушения будет замедленным. Природа такого разрушения недостаточно изучена [6,10,11]. В работе [10] отмечается, что возникновению такого замедленного разрушения способствуют факторы, вызывающие неоднородное развитие деформации и уменьшающие пластическую энергоёмкость (хрупкий слой на поверхности изделия, остаточные напряжения, риски от механической обработки, дефекты поверхности, маленькие радиусы закруглений и др.). Вероятность замедленного разрушения болтов возрастает с увеличением диаметра болта, особенно при постановке болта с перекосом [10]. Все очаги зарождения разрушения располагались во впадинах резьбы. Образующиеся серповидные трещины не имеют усталостных признаков.





Микрофотографии резьбовых участков болтов №№2,8,13 приведены на рис.2. Сопоставление изображений между собой показывает, что в более пластичном металле болта №2 при растяжении образуются мелкие надрывы незначительной протяженности. Для менее пластичного материала болтов №№8,13 во впадинах резьбы образуются единичные трещины, идущие в центральную часть стержня.

Весьма показательными являются данные замеров температуры поверхности образцов у изломов. Так, средняя температура в месте излома образцов 1-й серии достигала 40-50°C. Причем такая температура фиксировалась не только по поверхности излома, а по всей области пластического течения металла, где происходило заметное сужение поперечного сечения. Для образцов 2-й серии среднюю температуру у излома было сложно фиксировать из-за ее быстрого уменьшения во времени. Всплеск температуры у этих образцов наблюдался только непосредственно в плоскости излома (до 10-15°C), сталь смежных сечений практически не изменяла температуры. С повышением скорости нагружения температура поверхности излома образцов обеих серий заметно увеличивалась.

ВЫВОДЫ.

1. При проектировании и изготовлении болтовых соединений строительных конструкций, работающих в растянутых зонах, следует особое внимание уделять назначению материала болтов, технологии их изготовления, технологии последующей термообработки и

установки в проектное положение. Пригодность болтов для таких соединений следует определять по данным их испытаний по программе «В» ГОСТ 1759.4-87 в аккредитованном подразделении. При проектировании и изготовлении болтовых соединений следует руководствоваться принципом: болты в соединениях конструкций должны быть не менее работоспособны, чем другие элементы конструкций. При выборе материала болтов при одинаковых прочностных характеристиках предпочтение следует отдавать материалу с лучшей пластичностью. Изготовление резьбы следует производить методом накатки на специализированных производствах. Головку болта целесообразно образовывать горячей высадкой или штамповкой с обеспечением необходимой кривизны в закруглениях и обеспечением проектной формы опорной поверхности. Целесообразно применять мероприятия по уменьшению концентраторов напряжений и деформаций в переходной зоне между стержнем болта и началом резьбы.

2. Монтаж болтовых соединений следует производить в полном соответствии с требованиями проекта производства работ и не допускать дополнительных перекосов болта, динамических воздействий, неравномерного нагружения отдельных болтов соединения.

3. Для предотвращения неопределенностей в требованиях по проектированию растянутых болтов в действующие строительные нормы следует внести изменения. Так, в СНиП II-23/81*[1] п.11.6 целесообразно дополнить предложением: «Болты, нагруженные растягивающей эксцентричной нагрузкой, следует рассчитывать по формулам сложного сопротивления». В таблице 57*[1] примечания 2 и 3 необходимо объединить и изложить в следующей редакции: «В рабочих (КМ) и детализовочных (КМД) чертежах стальных конструкций и в документации на заказ следует указывать материал и дополнительные требования к испытаниям болтов всех классов прочности в соответствии с ГОСТ 1759.4-87». Пункт 1.4[1] целесообразно завершить фразой: «...эксплуатации и расчетных аварийных ситуациях, выявляемых в процессе анализа предельных состояний». Аналогичные уточнения необходимо внести и в соответствующие подпункты пунктов 1.1 и 4.2[12]. Требуется уточнения и пункт 1.2 СНиП III-18-75[13]. Первый абзац пункта 1.2[13] необходимо дополнить фразой: «Чертежи КМД разрабатывает предприятие-изготовитель или по согласованию с ним предоставляет заказчик».

4. Предотвращению аварийных ситуаций в строительных конструкциях, инициируемых разрывом растянутых болтов, послужит и повышение качества подготовки специалистов, участвующих в проектировании, изготовлении, монтаже, эксплуатации и устранении последствий аварий строительных конструкций. Для этого в учебных планах общетехнических дисциплин для студентов строительных специальностей следует предусмотреть часы на изучение соответствующих разделов механики разрушения, а при изучении дисциплины «Металлические конструкции» - анализировать на примерах аварий типичные предельные и аварийные состояния конструкций и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА.

1. СНиП II-23/81*. Стальные конструкции/Госстрой России.-М.: ГУП ЦПП, 2003.-90с.
2. Металлические конструкции. В 3т. Т.1. Элементы стальных конструкций: Учебное пособие для строит. вузов/ В.В.Горев, Б.Ю.Уваров, В.В.Филиппов и др..-М.: Высш.шк., 1997.-527с.
3. А.В.Сильвестров, Г.Г.Чибряков, Е.А.Мойсейчик. Прочность болтов узловых соединений структурных конструкций типа «МарХИ» при низких температурах// Надежность конструкций в экстремальных условиях. Сб.статей.-Якутск: Изд-во ЯГУ.-1984. с.77-82.
4. Аугустин Я., Шледзевский Е. Аварии стальных конструкций. Пер. с польск. М.: Стройиздат, 1978.-183с.
5. С.Е.Беляев. Исследование прочности болтов при растяжении с перекосом// Заводская лаборатория. 1945. №6. с.604-614.
6. В.В.Петько. Лабораторные методы оценки склонности стальных болтов к хрупкому разрушению со временем// Заводская лаборатория. 1956. №2. с.218-225.
7. И.А.Биргер. Расчет резьбовых соединений. - М.:Гос.изд-во оборонной промышленности.-1959.-252с.
8. Якушев А.И., Мустаев Р.Х., Мав

лютов Р.Р. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений.-М.: Машиностроение,1979.-215с. 9. Потапов В.Н., Мищик Б.С. Оценка работоспособности болтов, работающих на растяжение в стальных конструкциях// Промышленное строительство.-1982.- №5.- с.23-25. 10.Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов.-М.: Машиностроение,1978.-200с. 11. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1. Механические испытания. Деформация и разрушение.-М.:Машиностроение,1974.-472с. 12. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы / Госстрой СССР.-М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1998. – 200с. 13. СНиП III-18-75. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции / Госстрой СССР.-М., 1976. -161с.

УДК 629.113-587

Дубовик Д.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Введение. Криволинейное движение колесной машины в общем случае реализуется в результате управляющего воздействия водителя на рулевое колесо. Моделирование криволинейного движения основывается на математическом описании процессов воздействия на рулевое колесо и связанного с этим поворота управляемых колес.

В теории колесных машин криволинейное движение представляется совокупностью поворотов, характеризующихся вероятной кривизной и длиной траектории [1].

Процесс отдельного поворота машины в общем случае рассматривается в виде трех последовательных этапов [2, 3, 4 и др.]. Первый этап связан с увеличением кривизны траектории – переходом от прямолинейного движения к криволинейному (вход в поворот), второй этап характеризуется движением машины с постоянной кривизной (равномерный поворот), третий этап заключается в уменьшении кривизны траектории – возвращении к прямолинейному движению (выход из поворота). В частном случае второй этап может отсутствовать.

При изучении неустановившегося поворота и динамической поворачиваемости машин процесс поворота рулевого и управляемых колес на характерных этапах обычно представляется с помощью линейных зависимостей [2, 4, 5, 6, 7 и др.]. Это при переходе от одного этапа к другому приводит к воспроизведению при моделировании управляющих воздействий скачкообразного изменения скорости поворота управляемых колес, недостижимого при реальном управлении водителем колесной машиной, а также к трудностям применения теории нелинейного бокового увода [8] при моделировании неустановившегося криволинейного движения.

Целью настоящей работы явилась разработка математической модели криволинейного движения колесных машин с нелинейным управляющим воздействием, обеспечивающей более высокую сходимость расчетных значений с экспериментальными данными, чем известные из научно-технической литературы.

Моделирование управляющего воздействия на рулевое колесо. Для моделирования блока управляющих воздействий на рулевое колесо проанализируем экспериментальные данные [9], полученные при выполнении входа в поворот и движении колесной машины по синусоидальной траектории со скоростью 8,9 м/с.

Анализ экспериментальных данных (рис. 1) показывает, что реализуемые в действительности законы управляющего воздействия носят непрерывный характер, исключая скачкообразное изменение скорости поворота рулевого колеса. Причем, максимальная ско-