

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-78-86
УДК 622.242.4:539.374

Г.Б. Крыжевич^{1, 2, 3} , А.Р. Филатов^{1, 2} 

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет “Военмех” им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОРАЗЖИМНОГО СОЕДИНЕНИЯ СВАИ С ОСНОВАНИЕМ МОРСКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Объект и цель научной работы. Объектами работы являются узлы гидроразжимного соединения свай с опорными конструкциями морских стационарных платформ (МСП). Актуальность исследования связана с обнаружением на некоторых объектах трещин, вызванных формированием этих соединений. Цель работы состоит в поиске конструктивных решений, снижающих остаточные деформации, исключая появление трещиноподобных дефектов при гидроразжиме свай и повышающих эксплуатационную надежность свай. Достижение этой цели повышает технологичность процесса гидроразжима и способствует технологической независимости создателей российских МСП от зарубежных обладателей способов формирования гидроразжимных соединений.

Материалы и методы. Апробация возможных конструктивных решений выполнялась на основе численного моделирования процесса гидроразжима с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Учет пластического деформирования свай выполнен с применением линейной кинематической модели упрочнения.

Основные результаты. Для семи альтернативных вариантов конструктивного оформления гидроразжимного соединения получены диаграммы как пластического деформирования свай за полный рабочий цикл гидроразжима (с указанием максимальной накопленной пластической деформации), так и последующего вытягивания свай из опоры.

Заключение. На основе анализа полученных результатов выбрано оптимальное конструктивное оформление разжимного соединения, необходимое для снижения уровня пластических деформаций в свае, а также для повышения осевой жесткости самого соединения.

Ключевые слова: морские стационарные платформы, гидроразжим, сваи, численное моделирование, метод конечных элементов, пластическое деформирование, оптимизация.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-78-86
UDC 622.242.4:539.374

G.B. Kryzhevich^{1, 2, 3} , A.R. Filatov^{1, 2} 

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Baltic State Technical University “Voenmeh”, St. Petersburg, Russia

³ St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

DESIGN OPTIMIZATION AND RELIABILITY ENHANCEMENT FOR HYDRAULIC-RELEASE COUPLINGS OF PILLARS AND SUBSTRUCTURES FOR FIXED MARINE PLATFORMS

Object and purpose of research. This paper discusses hydraulic-release couplings of pillars and substructures for fixed marine platforms. This topic is relevant because at some platforms hydraulic-release couplings contribute to crack initia-

Для цитирования: Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Повышение технологичности и эксплуатационной надежности гидроразжимного соединения свай с основанием морской стационарной платформы. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 1(403): 78–86.

For citations: Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Design optimization and reliability enhancement for hydraulic-release couplings of pillars and substructures for fixed marine platforms. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 1(403): 78–86 (in Russian).

tion. The purpose of this study was to work out design solutions that would mitigate residual strains so as to preclude pillar cracking due to hydraulic release, thus making the pillars more durable. Achieving this purpose will make hydraulic release more suitable for routine operation, and will also make Russian manufacturers of fixed marine platforms more independent from Western patent holders of hydraulic release system designs.

Materials and methods. Design solutions suggested in this study were tried out through finite-element simulation of hydraulic release process. Plastic straining of pillars was taken into account by means of a linear kinematic model of hardening.

Main results. The study covered seven possible designs of hydraulic release units and yielded load diagrams for both plastic straining of pillar over the entire working cycle of hydraulic release (with indication of maximum accumulated plastic strain) and subsequent pillar pull-out from substructure.

Conclusion. The study yielded an optimal design solution for hydraulic release joint that both reduces plastic straining of pillar and increases axial stiffness of the joint itself.

Keywords: fixed marine platforms, hydraulic release, pillars, numerical simulation, FE method, plastic straining, optimization.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В настоящее время для соединения конструкций стационарных нефтегазодобывающих платформ и других морских сооружений с трубчатыми цилиндрическими сваями применяется технология гидравлического разжима, основанная на пластическом деформировании оголовков свай, при котором обеспечивается их плотный контакт с относительно жесткими гильзами (направляющими свай), неподвижно закрепленными на платформах.

При формировании такого разжимного соединения (РС) сваи и гильзы часто реализуется технология компании Oil States International, Inc., провайдером которой является фирма Hydra-Lok, аккредитованная в 1993 г. на соответствие стандарту BS5750 часть 1 (ISO 9001, EN29001) в сфере конструктивных решений, изготовления и эксплуатации устройств соединения и высаживания свай. РС типа Hydra-Lok Swaged Connection Systems [1] достигается за счет расширения внутренней трубы (сваи) в радиальном направлении до зацепления с гильзой (направляющей) с одновременным заполнением кольцевых полостей гильзы материалом сваи и образования значительной поверхности контакта гильзы и сваи путем непосредственного приложения внутреннего гидравлического давления.

Для создания этого давления и выполнения РС используется предложенный компанией специальный инструмент для гидроразжима, обеспечивающий одновременно центровку (соосность оголовка сваи и гильзы) и уплотнение системы на верхних и нижних границах зоны высокого давления жидкости.

Взаимное расположение гильзы и сваи перед гидравлическим разжимом и формированием разжимного соединения показано на рис. 1. При этом гильза закреплена на опорном основании МСП,

а свая погружена в грунт. Толщины свай и гильз (в районе их кольцевых полостей) могут достигать значительных величин, 90–100 мм и более.

В результате численного моделирования процесса гидроразжима толстостенных свай выявлены следующие недостатки РС, выполненного по технологии Hydra-Lok [2]:

- большой уровень пластических деформаций сваи после ее разжима, снижающий предельную и усталостную прочность оголовка сваи в эксплуатационных условиях, увеличивающий вероятность раннего появления трещин (даже в процессе монтажа) и снижающий эксплуатационную надежность Hydra-Lok Swaged Connection

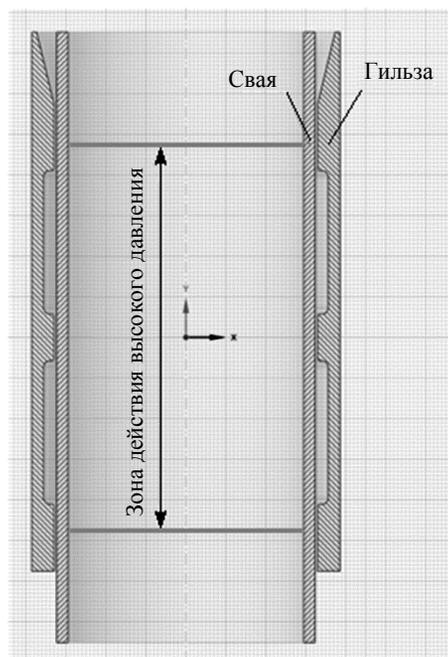


Рис. 1. Конструкция свайной опоры в разрезе
Fig. 1. A profile of support pillar

Systems (особенно при больших диаметрах свай); предварительное ударное нагружение сваи при ее забивке снижает пластические свойства материала [3, 4] и может способствовать появлению трещин при формировании РС;

- высокая чувствительность результатов моделирования процесса гидроразжима к особенностям диаграммы пластического деформирования материала сваи, свидетельствующая о зависимости оптимального давления при разжиге, обеспечивающего высокое качество соединения, от предела текучести и модуля упрочнения материала в состоянии поставки труб, а также после их динамического (ударного) нагружения;
- малая эффективная площадь контактной поверхности РС, формируемая при смещении сваи от-

носительно гильзы в вертикальном направлении (например, при изгибе сваи в эксплуатационных условиях), и большой уровень контактных напряжений, способных вызвать усталостные трещины в оголовке сваи, в частности, повреждения от фреттинг-усталости при эксплуатации.

Важно отметить, что после гидроразжима трещиноподобные дефекты в свае фиксировались в тех местах, где согласно численному моделированию появляется максимальная интенсивность пластических деформаций (и которые соответствуют примерно середине высоты кольцеобразных ниш, находящихся на гильзах). Трещины располагались в направлении, перпендикулярном к направлению максимальных деформаций, что дает основание предполагать, что эти деформации являлись причиной появления дефектов.

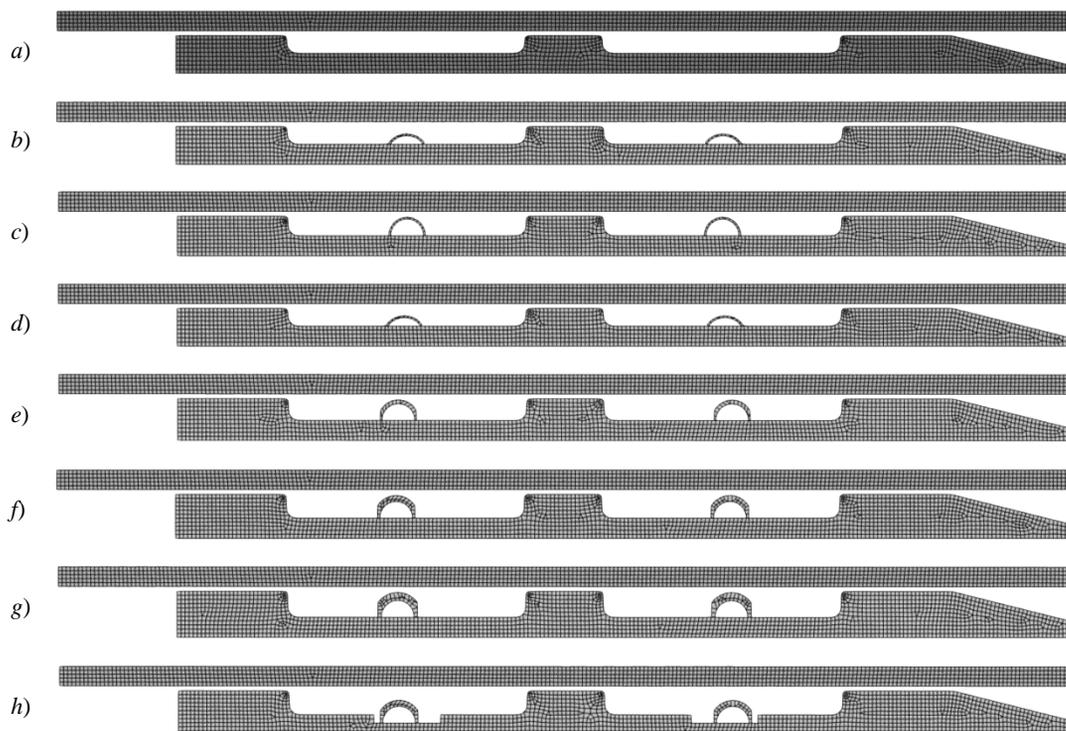
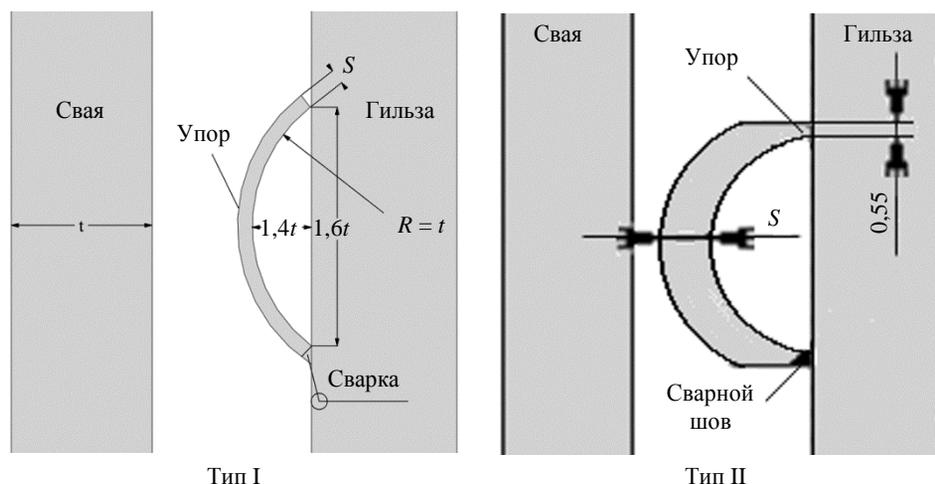


Рис. 2. Плоская осесимметричная конечно-элементная модель «свая – гильза»: а) исходная конструкция, повернутая на угол 90°; б) упор посередине кольцевых ниш гильзы, $h = 0,4t$, $S = 10$ мм; в) упор посередине, $h = 0,8t$, $S = 10$ мм; г) упор с компенсационным сдвигом (относительно середин ниш), $h = 0,4t$, $S = 10$ мм; е) упор с компенсационным сдвигом, $h = 0,8t$, $S = 20$ мм; ф) упор с компенсационным сдвигом, $h = 0,8t$, $S = 30$ мм; г) упор с компенсационным сдвигом, $h = 0,8t$, $S = 40$ мм; ж) упор с компенсационным сдвигом в дополнительной нише, $h = 0,8t$, $S = 30$ мм

Fig. 2. Axially symmetric planar FE "pillar-casing" model: а) initial structure turned by 90°; б) support in the middle of the casing's circular groves, $h = 0.4t$, $S = 10$ mm; в) support in the middle, $h = 0.8t$, $S = 10$ mm; г) support with compensating shear (with respect to groove middles), $h = 0.4t$, $S = 10$ mm; е) support with compensating shear, $h = 0.8t$, $S = 20$ mm; ф) support with compensating shear, $h = 0.8t$, $S = 30$ mm; г) support with compensating shear, $h = 0.8t$, $S = 40$ mm; ж) support with compensating shear in additional groove, $h = 0.8t$, $S = 30$ mm

Рис. 3. Размеры и расположение упора типов I и II по отношению к свае и гильзе

Fig. 3. Dimensions and location of Types I and II supports with respect to the pillar and the casing



Цель работы состоит в поиске конструктивно-технологических решений, снижающих остаточные деформации, исключающих появление трещиноподобных дефектов при гидроразжиге свай и повышающих эксплуатационную надежность свай.

Для достижения поставленной цели выполнено численное моделирование с помощью метода конечных элементов (МКЭ) процесса гидроразжиг свай при использовании новых элементов конструкции соединения сваи и гильзы – пластически деформируемых упоров, установленных на гильзе.

Материалы и методы

Materials and methods

Для численного моделирования гидроразжиг свай использовался МКЭ [2]. Задача решалась в плоской

осесимметричной постановке. В конечно-элементных (КЭ) моделях, показанных на рис. 3, использовались элементы второго порядка PLANE183. Помимо исходной конструкции рассмотрено еще 7 модификаций с дополнительными пластически деформируемыми кольцевыми упорами, установленными на гильзе (рис. 2). Использованы упоры двух типов (рис. 3) с различной толщиной, причем тип I использован в модификациях *a) – d)*, а тип II – в модификациях *e) – h)*.

Между свайей и гильзой моделировалась работа контактных пар с трением (рис. 4), в которых коэффициент трения был принят равным 0,1 для пары «сталь – сталь» в воде.

Нагружение конструкции происходило в три шага: 1. к части внутренней поверхности сваи прикладывалось рабочее давление гидроразжиг 70 МПа (рис. 5);

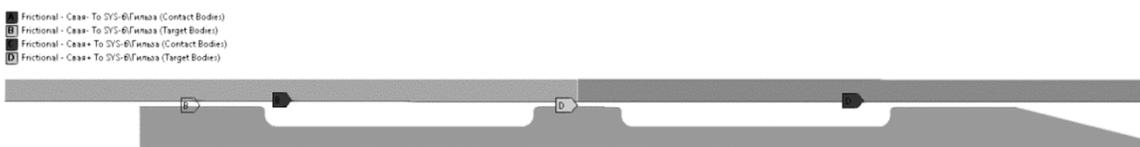


Рис. 4. Контактные пары «свая – гильза» на примере исходной конструкции, повернутой на угол 90°

Fig. 4. Contact couples “pillar-casing” for the initial structure turned by 90°



Рис. 5. Приложение рабочего давления гидроразжиг к части внутренней поверхности сваи на примере исходной конструкции, повернутой на угол 90°

Fig. 5. Applying operational pressure of hydraulic release to a part of the inner pillar surface for the initial structure turned by 90°



Рис. 6. Приложение осевой силы к торцу сваи на примере исходной конструкции, повернутой на угол 90°

Fig. 6. Applying axial force to pillar end for the initial structure turned by 90°



Рис. 7. Граничные условия (на примере исходной конструкции) закрепления от осевых перемещений: А) торца гильзы; В) середины сваи

Fig. 7. Boundary conditions for axial restriction (initial structure): A) casing end; B) pillar middle

2. рабочее давление было снято, чтобы получить распределение остаточных напряжений и деформаций;
3. к торцу гильзы прикладывалась осевая сила, перемещающая гильзу вдоль сваи (рис. 6).

Граничные условия для гильзы и сваи выбраны такими, что их нижние торцы, а также середина промежуточного кольцевого выступа гильзы на первых двух шагах нагружения были закреплены от осевых перемещений (рис. 7). На третьем шаге нагружения лишен осевых перемещений только нижний торец сваи.

Учет пластического деформирования выполнялся с помощью модели линейного кинематического упрочнения, описываемой двумя параметрами: предел текучести σ_y и касательный модуль (модуль упрочнения) E_T .

Определение касательного модуля E_T выполнялось с помощью подхода, предложенного в работе [5] и апробированного в работах [6–8], суть ко-

торого заключается в его вычислении на основании истинных напряжений и деформаций:

$$E_T = \frac{\sigma_f - \sigma_y}{\epsilon_f - \frac{\sigma_y}{E}}, \quad (1)$$

где σ_f – истинное сопротивление отрыву, которое для пластичных сталей может быть вычислено по формуле [9]

$$\sigma_f = \sigma_u(1 + 1,4\psi_c); \quad (2)$$

σ_u – временное сопротивление;

ψ_c – относительное сужение стандартного образца при разрыве, которое предлагается приблизительно вычислить по формуле

$$\psi_c \approx \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \ln(1 + \delta_c)}; \quad (3)$$

δ_c – относительное удлинение стандартного образца при разрыве;

Таблица 1. Модели и свойства материала

Table 1. Material models and properties

	Свая	Гильза
Материал	Сталь S355 G8	Сталь S355 G8
Плотность ρ , кг/м ³	7850	
Модель	Линейная упругая + линейное кинематическое упрочнение [9, 10]	
Модуль Юнга E , ГПа	206	
Коэффициент Пуассона ν	0,3	
Предел текучести σ_y , МПа	325	315
Временное сопротивление σ_u , МПа	570	530
Относительное удлинение δ_c	21 %	
Касательный модуль E_T , ГПа	3,46	3,16

ε_f – истинная деформация отрыва, которую для материалов с образованием шейки на стандартном образце предлагается оценить как

$$\varepsilon_f \approx \delta_c + \frac{\delta_f}{E}. \quad (4)$$

Свойства применяемых материалов, учитывающие их предварительное пластическое деформирование, приведены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Results and discussion

На рис. 8 (см. вклейку) показаны распределения накопленных пластических деформаций в конструкциях сваи и гильзы после снятия давления гидроразжима, а на рис. 9 (см. вклейку) приведена диаграмма накопления максимальных пластических деформаций в материале сваи за полный рабочий цикл гидроразжима.

В табл. 2 приведены максимальные значения интенсивности пластических деформаций сваи для каждой рассматриваемой конструкции разжимного соединения. Интересно отметить, что максимальные значения соответствуют не наружной, а внутренней поверхности сваи, испытывающей при гидроразжиге воздействие гидростатического давления. Это давление снижает жесткость напряженного состояния на внутренней поверхности и создает на ней возможность более свободного развития пластических деформаций, в результате чего уровень пластического деформирования наружной поверхности становится ниже по сравнению с внутренней.

Полезно подробнее обсудить причину появления положительного эффекта от установки на гильзе пластически деформируемых упоров. Для этого рассмотрим осесимметричный изгиб сваи в зоне, расположенной в середине высоты кольцеобразных ниш (точнее, в зоне максимальной кривизны, приобретенной в результате изгиба сваи). Записав условие равновесия элемента, испытывающего осесимметричный изгиб и расположенного в этой зоне, можно заметить, что цепное усилие в элементе прямо пропорционально разности усилий, создаваемых гидравлическим давлением разжима сваи и контактным усилием, развивающимся на деформируемом упоре. Чем меньше эта разность, тем меньше цепное усилие там, где в исходном варианте конструктивного исполнения наблюдается максимум главной пластической деформации и интенсивности деформаций (рис. 10а, см. вклейку). Одновременно со снижением цепных усилий происходит снижение жесткости напряженного состояния наружной поверхности сваи в зоне ее контакта с упором. В этой зоне создается возможность более свободного развития пластических деформаций, в результате чего пластическое деформирование происходит без больших структурных повреждений материала, уменьшающих его трещиностойкость.

Кроме того, в других зонах пластического деформирования наблюдается связанный с увеличением цепных напряжений рост остаточных деформаций, способствующий полезному выравниванию уровня пластических деформаций сваи вдоль кольцевых ниш гильзы. В дальнейшем (при больших деформациях упора) наблюдается относительно небольшое снижение контактного усилия, а затем

Таблица 2. Максимальная интенсивность пластических деформаций в свае за полный рабочий цикл гидроразжима

Table 2. Maximum intensity of plastic strain in the pillar over entire working cycle of hydraulic release

Конструкция соединения	Максимальная интенсивность пластических деформаций
<i>a)</i> исходная	11,12 %
<i>b)</i> упор 40×80, $S = 10$ посередине	9,90 %
<i>c)</i> упор 80×80, $S = 10$ посередине	11,16 %
<i>d)</i> упор 40×80, $S = 10$ со сдвигом	9,93 %
<i>e)</i> упор 80×80, $S = 20$ со сдвигом	10,22 %
<i>f)</i> упор 80×80, $S = 30$ со сдвигом	8,02 %
<i>g)</i> упор 80×80, $S = 40$ со сдвигом	6,60 %
<i>h)</i> упор 80×80, $S = 30$ в нише со сдвигом	10,19 %

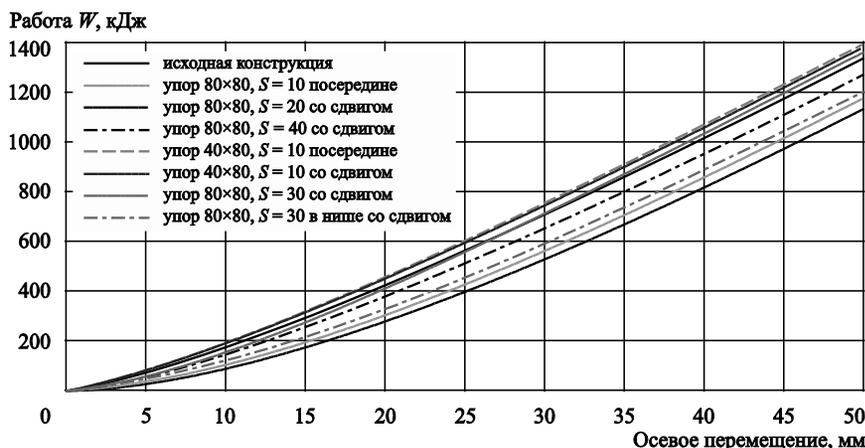


Рис. 12. Работа сил вытягивания сваи из гильзы
Fig. 12. Work of the forces pulling the pillar out of casing

(при существенном разгибании упора) – появление двух контактных зон на каждом упоре, увеличение суммарного контактного усилия и создание условий в этих зонах для свободного развития пластических деформаций. Следовательно, расположение на гильзе упора в районе максимального прогиба сваи может быть средством уменьшения цепных усилий в свае и остаточных деформаций в ее срединной поверхности.

Три наиболее эффективными решениями с точки зрения снижения уровня пластических деформаций оказались варианты упора $h = 0,8t$, $S = 40$ мм с компенсационным сдвигом (g), $h = 0,8t$, $S = 30$ мм с компенсационным сдвигом (f) и $h = 0,4t$, $S = 10$ мм посередине углубления в гильзе (b).

На рис. 11 (см. вклейку) показана диаграмма вытягивания сваи из гильзы после формирования разжимного соединения, а на рис. 12 – работа сил вытягивания. По первой диаграмме видно, что на участке от 0 до 27 мм осевого перемещения (от 0 до 1,2 % от наружного диаметра сваи) наибольшей жесткостью обладает вариант упора b ($h = 0,4t$, $S = 10$ мм), установленный посередине углубления в гильзе, и с небольшим отставанием от него идет вариант d упора $h = 0,4t$, $S = 10$ мм с компенсационным сдвигом.

В зарубежной практике в качестве нормируемого усилия вытягивания рассматривается его значение, соответствующее осевому перемещению сваи относительно гильзы, составляющему 1,2 % от наружного диаметра сваи. Максимальным усилием вытягивания и наибольшей жесткостью при вытягивании обладает вариант f упора $h = 0,8t$, $S = 30$ мм с компенсационным сдвигом. Однако на участке с осевыми перемещениями до 0,6 % от наружного диаметра сваи он обладает жесткостью

меньшей, чем даже у исходной конструкции. При этом по второй диаграмме видно, что во всем диапазоне допускаемых осевых перемещений наибольшей работой сил вытягивания обладает именно вариант b упора.

Заключение

Conclusion

Работа направлена на появление технологического суверенитета создателей российских МСП от зарубежных обладателей способов формирования гидроразжимных соединений. Показано, что для обеспечения высокого качества изготовления соединения сваи с гильзой, а также его высокой надежности и работоспособности целесообразно использование специального конструктивного элемента – деформируемого кольцевого упора, соединенного с гильзой.

Расположение упора в районе максимального прогиба сваи при ее гидроразжиме служит средством уменьшения цепных усилий в свае и остаточных деформаций в ее срединной поверхности. Предпринятый поиск эффективных конструктивных вариантов упоров показал, что рациональным может быть использование упора варианта g (рис. 8), которому соответствует снижение уровня максимальных остаточных деформаций сваи на 41 % по сравнению с исходным вариантом. При таком уменьшении деформаций можно относительно легко предотвратить технологические дефекты сваи в виде трещин при соединении ее с основанием морской стационарной платформы.

Однако при этом несущая способность соединения незначительно уменьшается (осевое усилие вытягивания, соответствующее нормативному

значению смещения, равному 1,2 % от наружного диаметра сваи, снижается примерно на 2 %). Поэтому значительный интерес представляет также вариант *b* деформируемого упора, обеспечивающий снижение максимальных пластических деформаций в свае на 11 % и одновременно повышающий осевое усилие вытягивания на 6 %. Важно отметить, что этот вариант обеспечивает самые высокие показатели потери энергии, расходуемой на вытягивание сваи (рис. 12). Это обстоятельство дает основание считать, что он гарантирует высокую эксплуатационную надежность разжимного соединения.

Список использованной литературы

1. Hydra-Lok Swaged Connection Systems / Oil States Industries // YouTube : [сайт]. URL: <https://youtu.be/FMRe5-Wozz4> (дата обращения: 24.04.2022).
2. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование формирования разжимных соединений свай с основаниями морских стационарных платформ и их работоспособности // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3, т. 1. С. 340–345. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.044.
3. Dynamic structures in shock-loaded copper / Y.I. Meshcheryakov, A.K. Divakov, N.I. Zhigacheva [et al.] // Physical Review B. 2008. Vol. 78, № 6. P. 064301. DOI: 10.1103/Physrevb.78.064301.
4. Баракхтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Динамические и фрактальные свойства стали СП-28 в условиях высокоскоростного нагружения // Журнал технической физики. 1998. Т. 68, № 10. С. 43–49.
5. Филатов А.Р. Метод проектирования судовых конструкций с использованием комплексного подхода к оптимизации топологии, размеров и формы : дис. ... канд. техн. наук / [Место защиты: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»]. Санкт-Петербург, 2020. 184 с.
6. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Численное моделирование процессов упругопластического деформирования перекрытия ледового пояса морской ледостойкой платформы // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2015. Вып. 86(370). С. 125–132.
7. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Оптимизация алюминиевой крышки люкового закрытия сухогрузного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1, т. 3. С. 58–65. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.036.
8. Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Филатов А.Р. Принципы и современные методы оптимального проектирования крупногабаритных судовых перекрытий //

- Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Спец. вып. 2. С. 83–88. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-83-88.
9. Махутов Н.А. Деформационные критерии и расчет элементов конструкций на прочность. Москва : Машиностроение, 1981. 272 с.
 10. Handbook of Materials Behavior Models : [Vol. 1–3] / Ed. Jean Lemaitre. San Diego ; London : Academic, 2001. XXVII, 1200 p.
 11. Mechanical APDL Theory Reference. Canonsburg : Ansys, 2021. 952 с.

References

1. Hydra-Lok Swaged Connection Systems / Oil States Industries // YouTube : [site]. URL: <https://youtu.be/FMRe5-Wozz4> (Accessed: 24.04.2022).
2. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Numerical simulation of design and operability of hydraulic locks connecting piles and substructures of fixed marine platforms // *Marine Intellectual Technologies*. 2022. No. 3, Vol. 1. P. 340–345. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.044 (*in Russian*).
3. Dynamic structures in shock-loaded copper / Y.I. Meshcheryakov, A.K. Divakov, N.I. Zhigacheva [et al.] // *Physical Review B*. 2008. Vol. 78, No. 6. P. 064301. DOI: 10.1103/Physrevb.78.064301.
4. Barakhtin B.K., Meshcheryakov Yu.I., Savenkov G.G. Dynamic and fractal properties of SP-28 steel under fast loading // *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki (Technical Physics)*. 1998. Vol. 68, No. 10. P. 43–49 (*in Russian*).
5. Filatov A.R. Structural ship design method based on the integrated approach to optimization of topology, dimensions and shape : Cand. Sci. theses / A.R. Filatov; Krylov State Research Centre. St. Petersburg, 2020. 184 p. (*in Russian*).
6. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Numerical simulation of elastic-plastic strain of ice belt grillage of offshore ice resistant platform // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2015. Vol. 86(370). P. 125–132 (*in Russian*).
7. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Optimization of aluminium hatch cover for bulk carrier // *Marine Intellectual Technologies*. 2020. No. 1, Vol. 3. P. 58–65. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.036 (*in Russian*).
8. Kryzhevich G.B., Norkov Ye.S., Filatov A.R. Principles and optimal design methods for large ship grillages // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2020. Special Issue 2. P. 83–88. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-83-88 (*in Russian*).
9. Makhutov N.A. Straining criteria and strength calculations of structural elements. Moscow : Mashinostroyeniye, 1981. 272 p. (*in Russian*).

10. Handbook of Materials Behavior Models : [Vol. 1–3] / Ed. *Jean Lemaitre*. San Diego ; London : Academic, 2001. XXVII, 1200 p.
11. Mechanical APDL Theory Reference. Canonsburg : Ansys, 2021. 952 p.

Сведения об авторах

Крыжевич Геннадий Брониславович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр», профессор кафедры механики деформируемого твердого тела ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова», профессор кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-74. E-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4856-4617>.

Филатов Антон Романович, к.т.н., старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр», доцент кафедры высшей математики ФГБОУ

ВО «Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-21. E-mail: filatov_ar@voenmeh.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7352-3003>.

About the authors

Gennady B. Kryzhevich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Krylov State Research Centre, Professor, Department of Mechanics of Deformable Solids, Baltic State Technical University “Voenmekh”, named after D.F. Ustinov Professor, Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-74. E-mail: g_kryzhevich@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4856-4617>.

Anton R. Filatov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Krylov State Research Centre, Associate Professor, Higher Mathematics Department, Baltic State Technical University “Voenmekh”. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-21. E-mail: filatov_ar@voenmeh.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7352-3003>.

Поступила / Received: 05.10.22
Принята в печать / Accepted: 08.02.23
© Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р., 2023

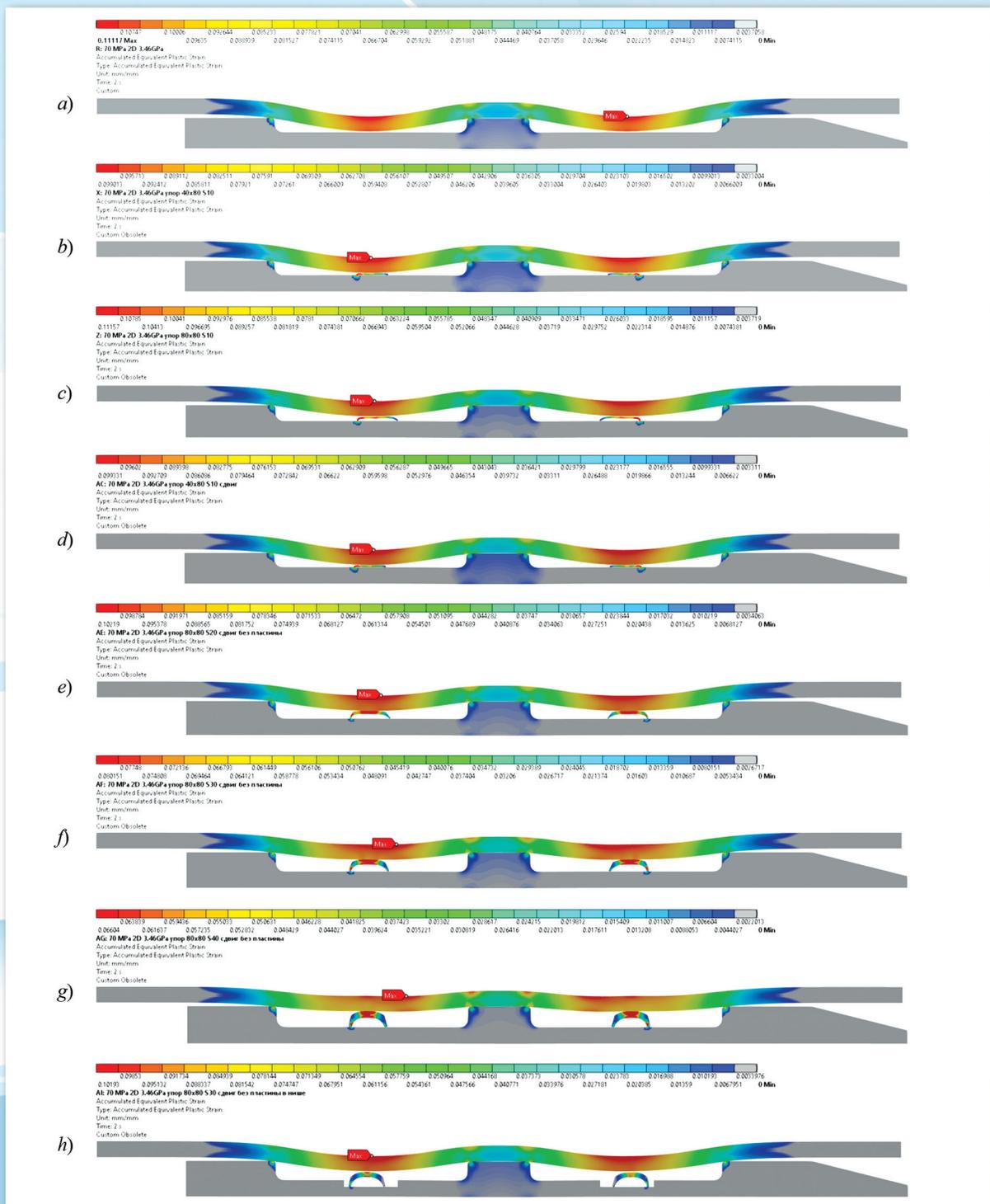


Рис. 8. Распределение накопленных пластических деформаций после снятия рабочего давления гидроразжима: а) исходная конструкция, повернутая на угол 90°; б) упор посередине кольцевых ниш гильзы, $h = 0,4t$, $S = 10$ мм; в) упор посередине, $h = 0,8t$, $S = 10$ мм; д) упор с компенсационным сдвигом (относительно середин ниш), $h = 0,4t$, $S = 10$ мм; е) упор с компенсационным сдвигом, $h = 0,8t$, $S = 20$ мм; ф) упор с компенсационным сдвигом, $h = 0,8t$, $S = 30$ мм; г) упор с компенсационным сдвигом, $h = 0,8t$, $S = 40$ мм; з) упор с компенсационным сдвигом в дополнительной нише, $h = 0,8t$, $S = 30$ мм

Fig. 8. Distribution of accumulated plastic strain after relief of operational release pressure: а) initial structure turned by 90°; б) support in the middle of the casing's circular groves, $h = 0.4t$, $S = 10$ mm; в) support in the middle, $h = 0.8t$, $S = 10$ mm; д) support with compensating shear (with respect to groove middles), $h = 0.4t$, $S = 10$ mm; е) support with compensating shear, $h = 0.8t$, $S = 20$ mm; ф) support with compensating shear, $h = 0.8t$, $S = 30$ mm; г) support with compensating shear, $h = 0.8t$, $S = 40$ mm; з) support with compensating shear in additional groove, $h = 0.8t$, $S = 30$ mm

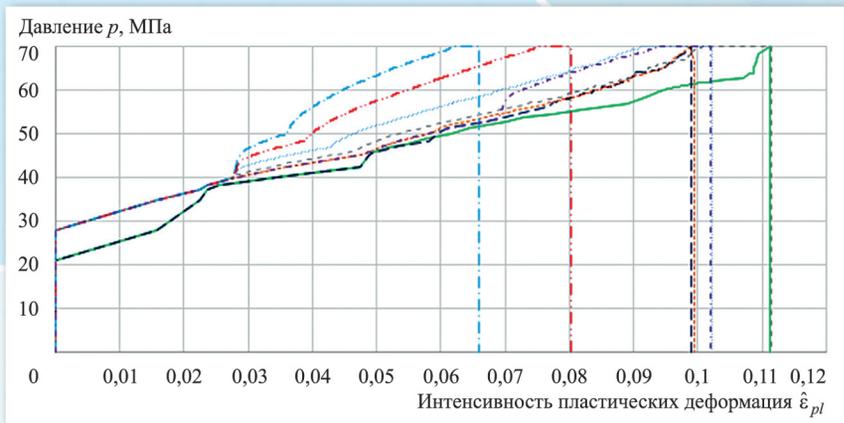


Рис. 9. Диаграмма накопления пластических деформаций в свае за полный рабочий цикл гидроразжима

Fig. 9. Diagram of plastic strain accumulation in the pillar over entire working cycle of hydraulic release

- исходная конструкция
- - - упор 80×80, $S = 10$ посередине
- · · упор 80×80, $S = 20$ со сдвигом
- · - упор 80×80, $S = 40$ со сдвигом
- - - упор 40×80, $S = 10$ посередине
- · - упор 40×80, $S = 10$ со сдвигом
- · - упор 80×80, $S = 30$ со сдвигом
- · - упор 80×80, $S = 30$ в нише со сдвигом

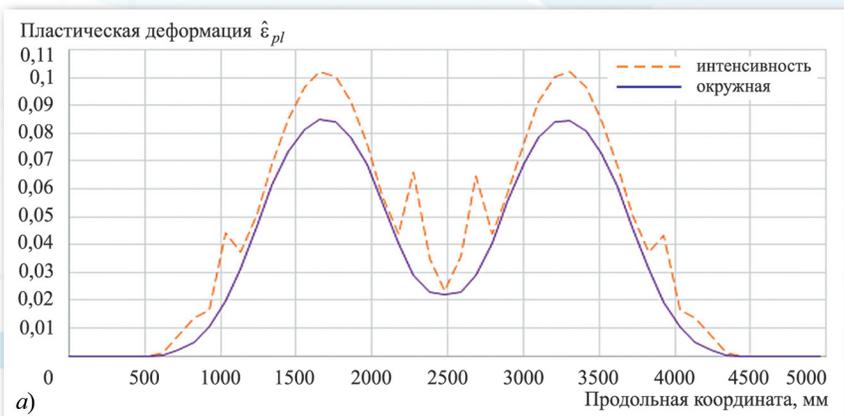
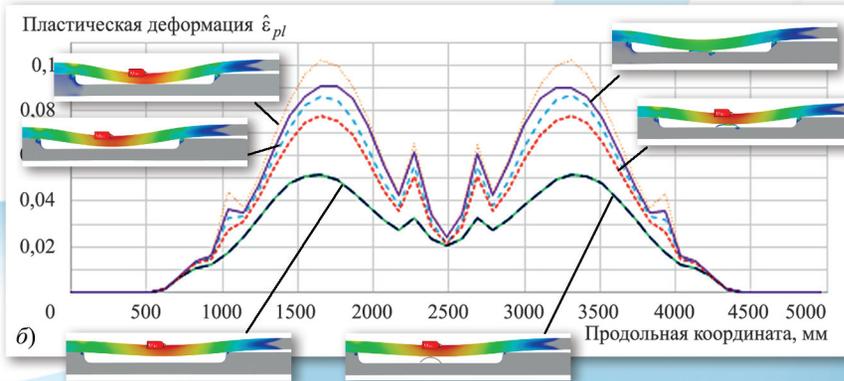


Рис. 10. Распределение интенсивности деформаций и главной (окружной) пластической деформации по наружной поверхности сваи (вдоль деформированного положения образующей этой поверхности) для исходной конструкции (а); сопоставление пластических деформаций по этой поверхности для исходной конструкции и конструкции с упором $h = 0,8t$, $S = 40$ мм при различных значениях давления разжима (б)

Fig. 10. Distribution of plastic strain intensity and principal (circumferential) plastic strain over the outer pillar surface (along the deformed generatrix position for this surface) for initial structure: a) comparison of plastic straining over this surface for initial structure and structure with support $h = 0.8t$, $S = 40$ mm for different release pressures (b)



- 50 МПа, исходная конструкция
- · - 60 МПа, исходная конструкция
- · · 70 МПа, исходная конструкция
- - - 50 МПа, упор 40×80, $S = 10$ посередине
- · - 60 МПа, упор 40×80, $S = 10$ посередине
- · - 70 МПа, упор 40×80, $S = 10$ посередине

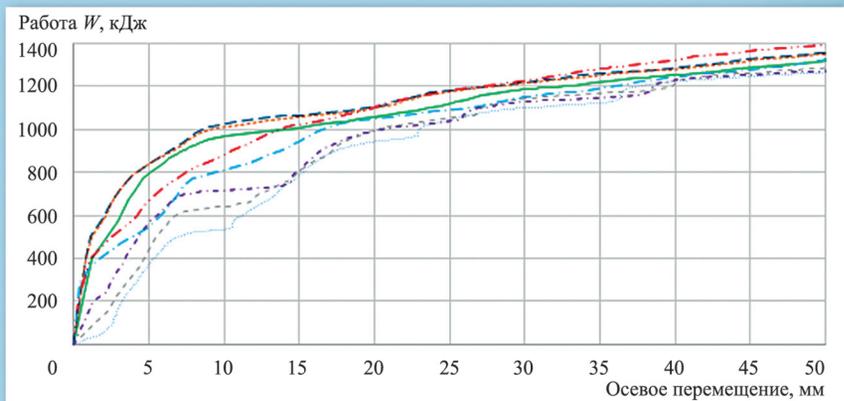


Рис. 11. Диаграмма вытягивания сваи из гильзы

Fig. 11. Diagram of pillar pull-out from casing

- исходная конструкция
- - - упор 80×80, $S = 10$ посередине
- · · упор 80×80, $S = 20$ со сдвигом
- · - упор 80×80, $S = 40$ со сдвигом
- - - упор 40×80, $S = 10$ посередине
- · - упор 40×80, $S = 10$ со сдвигом
- · - упор 80×80, $S = 30$ со сдвигом
- · - упор 80×80, $S = 30$ в нише со сдвигом