

20. Ovsianikova, T., Nikolaenko, M. Sustainable urban built environment: Modern management concepts and evaluation methods // AIP Conference Proceedings. – Volume 1800, Issue 1 10.1063/1.4973062 [Электронный ресурс]. – URL <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4973062>.

21. Гурова Е.В., Калашникова Ю.С. Михеева Т.А., Капитонова И.С. Социальные аспекты и градостроительные перспективы реконструкции промышленной застройки // Социально-экономические и технологические проблемы развития строительного комплекса региона. Наука. Практика. Образование. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Волгоград. 2009. С.444-445.

22. Купчикова Н.В., Чумакова А.В. Рейтинговая оценка устойчивости среды обитания жилого комплекса по системе «Зеленое строительство» // Перспективы развития строительного комплекса. – 2014 С. 345.

© Н. В. Купчикова

Ссылка для цитирования:

Н. В. Купчикова. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов мелкого заложения: региональные особенности учёта и оценки деформаций при эксплуатации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4 (30). С. 85–89.

УДК 614.841.33(083.7)

НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ РЕЖИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРЕВЕ

В. С. Федоров, В. Е. Левитский

«Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ), г. Москва, Россия

Представлен анализ деформирования бетона при нестационарном нагреве в условиях постоянного, возрастающего и убывающего режима нагружения. Выявлено, что нелинейные деформации в условиях кратковременного нагрева под нагрузкой определяются только уровнем напряжений и температурой и не зависят от режима изменения силового воздействия. Построена модель поведения бетона и выполнена калибровка её коэффициентов. Рассчитанные кривые полных деформаций бетона, а также графики изменения реактивного усилия в образце, нагреваемого при полном ограничении температурных деформаций, показали удовлетворительную сходимость с данными экспериментов. В результате анализа выявлено что, для моделирования термосилового сопротивления сжатого бетона при нагреве под нагрузкой, в том числе в условиях режимного нагружения, необходимо задавать 8 температурных параметров, а также три характеристики работы при нормальных условиях (R_b , E_b , ϵ_{bu}). Полученные зависимости выражены в функции деформаций и удобны для расчетной реализации.

Ключевые слова: *нагрев под нагрузкой, кратковременная температурная ползучесть, неявная модель, диаграмма деформирования, предельные структурные напряжения*

NONLINEAR CONCRETE DEFORMATION UNDER CONDITIONS OF MODE LOADING AT SHORT-TIME UNSTEADY HEATING

V. S. Fedorov, V. E. Levitskiy

Russian Transport University RUT (MIIT), Moscow, Russia

The analysis of concrete deformation during unsteady heating under conditions of constant, increasing and decreasing loading conditions is presented. It was revealed that nonlinear deformations under conditions of short-term heating under load are determined only by the level of stresses and temperature and are not dependent on the mode of change in the force action. A concrete behavior model is constructed and its coefficients are calibrated. The calculated curves of the total deformations of concrete, as well as the graphs of the changes in the reactive force in the sample heated with complete limitation of temperature deformations showed satisfactory convergence with the experimental data. As a result of the analysis, it was revealed that, for modeling the thermo-strength resistance of compressed concrete when heated under load, including under conditions of operational loading, it is necessary to set 8 temperature parameters, as well as three operating characteristics under normal conditions (R_b , E_b , ϵ_{bu}). The obtained dependences are expressed in the deformation function and are convenient for the calculated implementation.

Keywords: *heating under load, load induced thermal strain, implicit model, constitutive relationship, ultimate structural stresses.*

В условиях пожара несущие железобетонные конструкции подвергаются нестационарному высокотемпературному огневому воздействию в нагруженном состоянии. Однако необходимые для расчетов диаграммы деформирования бетона в прямом виде могут быть получены, как и при нормальной температуре, по результатам испытаний до разрушения предварительно нагретых образцов (heat-then-load regime, HTL, рис. 1). Более близкими к реальным условиям работы бетона в конструкции являются испытания при нестационарном нагреве предварительно нагруженных образцов (load-then-heat regime, LTH, рис. 2).

Сравнением результатов большого количества испытаний выявлено, что деформации бетона при нагреве под нагрузкой оказываются примерно в два раза больше, чем при нагружении после нагрева [1]. Это принято связывать с кратковременной температурной ползучестью бетона, вызванной нагрузкой, (LITS), которую также называют Transient Thermal Creep (TTC), Transient Thermal Strain (TTS), drying creep и др.

В научной и нормативной литературе имеется большое количество вариантов представления связи напряжений и деформаций бетона в условиях кратковременного высокотемпературного нагрева, отличающиеся способом нормирования

температурных параметров, записью связи функции напряжения-деформации, углом наклона нисходящей ветви и т.д. Но при моделировании термосилового сопротивления бетона важно не только предложить адекватную математическую модель, но учитывать условия, в которых были получены ее исходные характеристики.

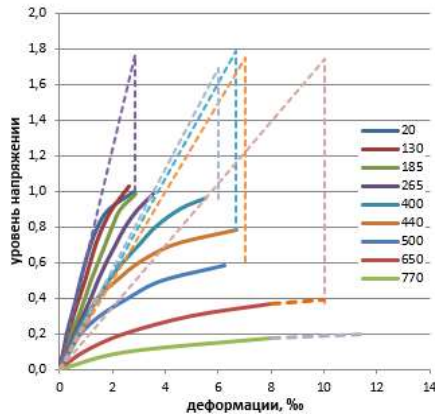


Рис. 1. Диаграммы деформирования при различных температурах (нагружение после нагрева)

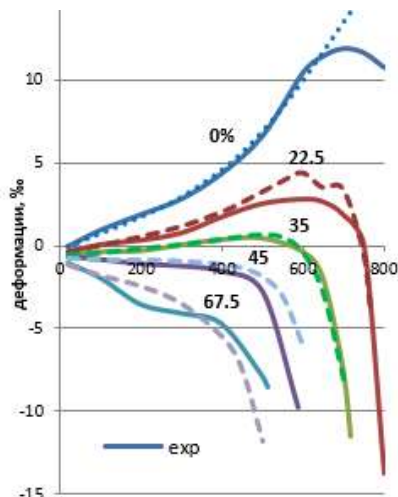


Рис. 2. Кривые полных деформаций при нагреве (5 °С/мин) под нагрузкой при различных уровнях нагружения

Первые экспериментальные свидетельства LITS появились в 1960-х годах. Подробный обзор исследований, проведенных до середины 1980-х годов, был подготовлен Khoury [2], результаты более поздних экспериментальных и аналитических работ по исследованию LITS при одноосных и многоосных условиях содержатся в обзоре G. Torelli [3]. Данные экспериментов свидетельствуют, что LITS возникает только при первом нагреве и не зависит от скорости нагрева при изменении ее в пределах 1–15 °С/мин.

Причину возникновения LITS принято связывать с движением влаги в неизолированных бетонных образцах, а также с химическими реакциями и микроструктурными изменениями, происходящими в цементном камне, такими как дегидратация, сушка и перегруппировка

молекул воды. Как правило, эти же факторы указывают в качестве причин снижения модуля упругости бетона при нагреве.

Существующие модели LITS принято подразделять на явные и неявные. Термин «явный» стал использоваться для обозначения моделей, в которых компонент LITS явно сформулирован в определяющих соотношениях, в дополнение к мгновенному напряженному напряжению [4]. Для явных моделей обычно применяется разложение деформации, предложенное в [1]:

$$\varepsilon_{b, \text{tot}}(\sigma, T, t) = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(\sigma, T) + \varepsilon_{cr}(\sigma, T, t) + \varepsilon_{tr}(\sigma, T), \quad (1)$$

где σ – напряжение, T – температура, t – время, ε_{th} – температурная деформация, ε_{σ} – мгновенная силовая деформация (возникающая при нагружении после нагрева), ε_{cr} – деформации изотермической ползучести, ε_{tr} – переходные деформации (LITS).

В условиях кратковременного нагрева, характерного для пожара, компонент ε_{σ} может быть опущен, поскольку вклад изотермической ползучести в общую деформацию незначителен. Это связано с тем, что время, необходимое для развития деформаций ползучести, обычно намного больше, чем продолжительность переходной фазы, даже для низких скоростей нагрева [5].

Исследователями предложены различные формы записи компонента ε_{tr} в зависимости от уровня напряжений [1; 6; 7; 8]. Однако, чтобы воспользоваться ими в расчете, уровень напряжений должен быть известен.

В отличие от явных моделей, неявные модели рассматривают мгновенную деформацию ε_{σ} и переходную ε_{tr} LITS как единый механический эластопластический компонент деформации ε :

$$\varepsilon_{b, \text{tot}}(\sigma, T) = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_b(\sigma, T). \quad (2)$$

Основным недостатком неявных моделей является то, что они не могут зафиксировать разницу между режимами НТЛ и ЛТН, поскольку они подходят только для условий ЛТН. Кроме того, они не позволяют моделировать случаи, связанные с механической разгрузкой материала [4]. Однако, если связь напряжений и деформаций записана в функции деформаций, использование неявных моделей более удобно.

При построении модели поведения бетона при нагреве под нагрузкой нами приняты следующие исходные предпосылки, подтверждающиеся результатами многочисленных экспериментальных исследований.

1. Рассматриваются линейный и нелинейный компоненты деформации. Линейные деформации связаны с вязким и упругим поведением материала, и являются частично обратимыми. Нелинейные деформации вызваны развитием микротрещин в структуре бетона (хрупкий компонент), необратимы и приводят к снижению прочности.

2. Нелинейные деформации в условиях кратковременного нагрева определяются только уровнем напряжений и температурой. Они принимаются независимыми от последовательности приложения температурного и силового воздействий и от режима изменения силового воздействия в процессе нестационарного нагрева. Данный факт подтверждается результатами испытаний при постоянном, возрастающем и убывающем режиме нагружения, показанными на рис. 3. Температура разрушения образцов определялась только последним значением напряжения, а развитие деформаций происходило по тем же кривым, смещенным на величину необратимых деформаций, полученных на предшествующих этапах нагрева (для примера показано пунктирной линией для уровня нагружения 22,5%).

3. Диаграмма деформирования бетона при нагреве под нагрузкой имеет такой же вид, как и при нагружении после нагрева, и отличается лишь величиной начального модуля. Деформации LITS явным образом заложены в величину линейного компонента. Это подтверждает выводы [1; 2; 10], что деформации LITS пропорциональны уровню напряжений, когда они не превышают 30-40% прочности на сжатие.

4. Предельные структурные напряжения в бетоне $E_b \epsilon_{bu}$ принимаются не зависящими от температуры нагрева (см. рис. 1). Это позволяет установить связь между снижением прочности бетона при нагреве и степенью развития его нелинейных деформаций. Снижение модуля деформаций бетона при нагреве в этом случае может быть определено по величине предельных силовых деформаций бетона:

$$E_b \epsilon_{bu} = E_{b,T} \epsilon_{bu,T}, \quad (3)$$

где E_b – начальный модуль деформаций бетона; ϵ_{bu} – деформации в вершине диаграммы.

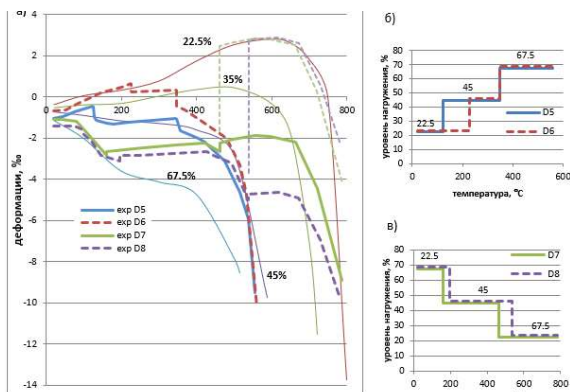


Рис. 3. Деформирование бетона при нестационарном нагреве в условиях постоянного, возрастающего и убывающего режима нагружения; а – развитие полных деформаций; б – возрастающий режим; с – убывающий режим

Диаграммы деформирования бетона при нагружении после нагрева и при нагреве под

нагрузкой, полученные в соответствии с принятыми предпосылками, показаны на рис. 4. Если принять, что прочность бетона при нагреве до заданной температуры не зависит от последовательности температуры и нагрузки, то величина структурных повреждений бетона будет тоже одинакова. Несмотря на то, что на графике нелинейная часть диаграммы LHT зрительно кажется более развитой, отношение нелинейных деформаций к линейным при заданном уровне нагружения остаётся одинаковым. Замена суммы деформаций на произведение избавляет от трудоемких нелинейных построений при моделировании LITS, предпринятое многими авторами [1; 6; 7; 8].

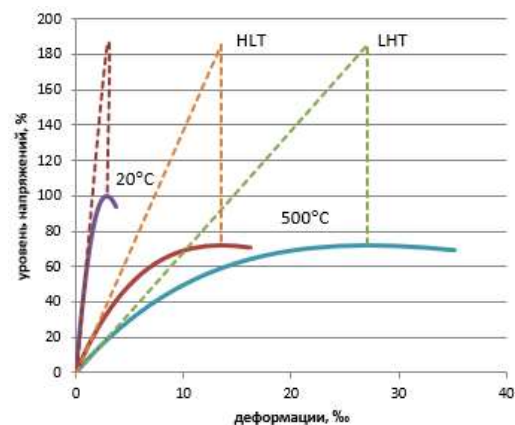


Рис. 4. Диаграммы деформирования бетона при нагружении после нагрева (HLT) и при нагреве под нагрузкой (LHT). Пунктирные линии показывают независимость предельных структурных напряжений от температуры нагрева

Термосиловые деформации нагруженного бетона при резкорезимном нагреве будем представлять в неявной форме (2) как сумму двух частных компонентов – температурного и силового. Уравнение связи напряжений σ_c и силовых деформаций бетона ϵ_b при нагреве под нагрузкой записывается через секущий модуль деформаций бетона $E_{b,T} \cdot \nu_b$ в виде, аналогичному при нагружении после нагрева

$$\sigma_b = E_{b,T} \cdot \nu_b \cdot \epsilon_b. \quad (4)$$

Индексом T здесь и далее обозначены параметры, зависящие только от температуры нагрева бетона и не зависящие от уровня его нагружения.

Коэффициент секущего модуля ν_b выражается экспоненциальной зависимостью вида

$$\nu_b = \exp \left[-k_{b,T} \cdot \left(\frac{\epsilon_b}{\epsilon_{bu,T}} \right)^{1/k_{b,T}} \right], \quad (5)$$

где $\eta_c = \epsilon_b / \epsilon_{bu,T}$ – текущий уровень деформаций бетона; $k_{b,T}$ – параметр нелинейности деформирования, определяемый через коэффициент секущего модуля в вершине диаграммы $\nu_{bu,T}$:

$$k_{b,T} = -\ln \nu_{bu,T}. \quad (6)$$

При нормальной температуре коэффициент секущего модуля в вершине ν_{bu} определяется через соответствующие предельные деформации ε_{bu} , прочность R_b и начальный модуль деформаций бетона E_b :

$$\nu_{bu} = \frac{R_b}{E_b \varepsilon_{bu}}. \quad (7)$$

При нагреве снижение прочности и начального модуля деформаций бетона учитывается коэффициентами $\gamma_{b,T}$ и $\beta_{b,T}$:

$$R_{b,T} = R_b \cdot \gamma_{b,T}, \quad (8)$$

$$E_{b,T} = E_b \cdot \beta_{b,T}. \quad (9)$$

Предпосылка о независимости предельных структурных напряжений в бетоне от температуры нагрева позволяет использовать параметр $\gamma_{b,T}$ для определения коэффициента секущего модуля в вершине $\nu_{bu,T}$:

$$\nu_{bu,T} = \nu_b \cdot \gamma_{b,T}, \quad (10)$$

а параметр $\beta_{b,T}$ – для определения соответствующих ему предельных деформаций $\varepsilon_{bu,T}$:

$$\varepsilon_{bu,T} = \varepsilon_{bu} / \beta_{b,T}. \quad (11)$$

Температурные зависимости коэффициентов $\gamma_{b,T}$ и $\beta_{b,T}$, а также температурные деформации ε_{th} записываются в виде экспоненциальных функций, аналогичных выражению (5):

$$\gamma_{b,T} = \exp \left[-\gamma \cdot \left(\frac{T_b - 20}{1000} \right)^m \right]; \quad (12)$$

$$\beta_{b,T} = \exp \left[-\beta \cdot \left(\frac{T_b - 20}{1000} \right)^n \right]; \quad (13)$$

$$\varepsilon_{th} = \alpha_1 \cdot (T_b - 20) + \varepsilon_\alpha \cdot \left[1 - \exp \left[-\alpha_2 \cdot \left(\frac{T_b - 20}{1000} \right)^p \right] \right], \quad (14)$$

где T_b – температура нагрева бетона; 20°C – начальная температура; γ , β , m , n , α_1 , α_2 , p , ε_α – опытные параметры, получаемые по результатам испытаний предварительно нагруженных образцов при нестационарном нагреве.

Для принятого в [1] состава бетона проведена калибровка коэффициентов предлагаемой модели: $\gamma = 3$, $\beta = 3,5$, $m = 3$, $n = 0,6$, $\alpha_1 = 0,0095$, $\alpha_2 = 4$, $p = 4$, $\varepsilon_\alpha = 12$. Характерные диаграммы деформирования бетона при различных температурах нагрева под нагрузкой, полученные по представленным выражениям, показаны на

рис. 5. Рассчитанные кривые полных деформаций бетона, а также графики изменения реактивного усилия в образце, нагреваемого при полном ограничении температурных деформаций (рис. 6) показали удовлетворительную сходимость с данными экспериментов [1].

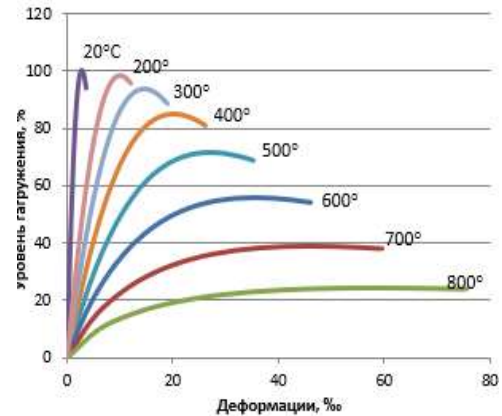


Рис. 5. Диаграммы деформирования бетона при различных температурах (нагрев под нагрузкой)

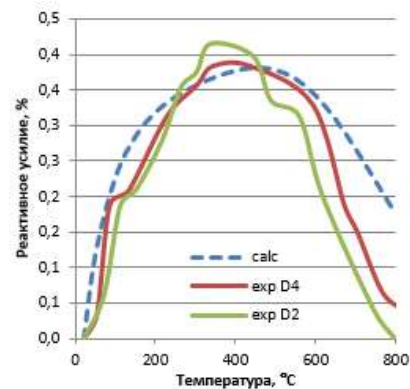


Рис. 6. Реактивное усилие в образце, нагреваемого при полном ограничении температурных деформаций со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ (D2) и $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ (D4). Экспериментальные данные: [1]

Для моделирования термосилового сопротивления сжатого бетона при нагреве под нагрузкой, в том числе в условиях режимного нагружения, необходимо задать 8 температурных параметров, а также три характеристики работы при нормальных условиях (R_b , E_b , ε_{bu}). Полученные зависимости выражены в функции деформаций и удобны для расчетной реализации

Список литературы

1. Anderberg Y, Thelandersson S. Stress and deformation characteristics of concrete at high temperature: 2. Experimental investigation and material behaviour model. Bull. No. 46, Lund; 1976, p. 86.
2. Khoury GA, Grainger BN, Sullivan PJE. Transient thermal strain of concrete; literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents. Mag Concr Res 1985;37:131-44.
3. G. Torelli et al. Concrete strains under transient thermal conditions: A state-of-the-art review. Engineering Structures 127 (2016) 172-188.
4. Gernay T, Franssen JM. A comparison between explicit and implicit modelling of transient creep strain in concrete uniaxial constitutive relationships. In: Conf. proc. - fire mater. 2011, 12th Int. Conf. Exhib.; 2011. p. 405-16.

5. Schneider U. Concrete at high temperatures – a general review. Fire Saf J 1988;13:55–68.
6. Nielsen CV, Pearce CJ, Bicanic N. Theoretical model of high temperature effects on uniaxial concrete member under elastic restraint. Mag Concr Res 2002; 54:239–49. <http://dx.doi.org/10.1680/mac.54.4.239.38809>.
7. Li L, Purkiss J. Stress–strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures. Fire Saf J 2005; 40:669–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.06.003>.
8. Terro MJ. Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire. ACI Struct J 1998; 95:183–93.
9. Fedorov V.S., Levitskiy V.E. Constitutive Relationships of Concrete and Reinforcing Steel under High Temperatures // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725-726. pp. 124 – 129.
10. Mindeguia J-C, Hager I, Pimienta P, Carré H, La Borderie C. Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete. Cem Concr Res 2013;48:40–52.

© В. С. Федоров, В. Е. Левитский

Ссылка для цитирования:

В. С. Федоров, В. Е. Левитский. Нелинейное деформирование бетона в условиях режимного нагружения при кратковременном нестационарном нагреве // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4 (30). С. 89–93.

УДК 624.154.1; 624.154.8

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ УШИРЕНИЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ С УЧЁТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Н. В. Купчикова

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия

Аннотация: в статье анализируются основные предпосылки теории формообразования геометрии концевых уширений из втрамбованного щебня. В результате анализа технологий устройства свайных фундаментов с уширениями из щебня и по результатам экспериментальных исследований даны рекомендации по подбору расчётных схем концевых уширений в зависимости от конструктивного решения сваи, технологии её погружения и способа устройства концевого уширения, а также грунтовых условий. Выполнены численные расчёты в двухмерной и трёхмерной постановке для определения НДС фундамента с помощью программного комплекса MIDAS GTS_NX, реализующем метод конечных элементов и разработанной для сложных геотехнических задач. Установлено, что формообразование концевых уширений происходит в зависимости от деформационно-прочностных параметров работы конструкции в целом, а именно диаметра сваи, фракции и объёма щебня, диаметра уплотнения грунтового полупространства, а также развития формы геометрии концевых уширений.

Ключевые слова: буронабивная микросвая, втрамбованный щебень, формообразование свай с уширениями.

FORMATION OF END EXPANSIONS OF DRILLING PILES WITH ACCOUNT OF EXPERIMENTAL ANALYTICAL AND NUMERICAL RESEARCH METHODS

N. V. Kupchikova

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russia

Abstract: the article analyzes the basic premises of the theory of shaping the geometry of end broadening from rammed rubble. As a result of the analysis of the technologies for constructing pile foundations with broadenings from rubble and according to the results of experimental studies, recommendations are given on the selection of design patterns for end broadening depending on the design of the pile, the technology of its immersion and the method of end broadening, as well as soil conditions. Numerical calculations were performed in two-dimensional and three-dimensional formulations to determine the foundation VAT using the MIDAS GTS_NX software package that implements the finite element method and was developed for complex geotechnical problems. It was established that the shaping of the end broadening occurs depending on the deformation-strength parameters of the structure as a whole, namely, the diameter of the pile, fraction and volume of crushed stone, the diameter of the compacted soil half-space, as well as the development of the geometry of the end broadening from rammed crushed stone in the form of a rotation ellipsoid.

Keywords: bored micro pile, compacted crushed stone, broadening shaping.

Возросшие объёмы строительства зданий и сооружений в соответствии с современными принципами устойчивого развития в проектировании требуют устройства фундаментов глубокого заложения с увеличенными прочностными показателями, как самой конструкции, так и основания, особенно структурно-неустойчивого. Зачастую для неустойчивых грунтов устраивают фундаменты глубокого заложения с уширениями.

В результате анализа практических технологий выявлено [1–27], что для образования уширения поперечного сечения сваи в конце ствола сваи используют различные способы: разбуривание, вдавливание, раскатывание грунта, физико-химическое инъецирование, буровзрывной способ, ис-

пользование разрядно-импульсной технологии, механического глубинного втрамбовывания, с помощью электрогидравлического эффекта, втрамбовывание щебня, гравия и т.д. Сложность устройства конструкций свай с уширениями определяется совокупностью конструктивных, технологических и стоимостных требований. В результате чего развитие системы принципов формообразования, как процесса создания и развития конструктивных форм, свайных фундаментов с уширениями в грунтовом массиве для площадок с различными инженерно-геологическими условиями является одной из актуальных и не решённых задач в современной геотехнике.