

УДК 69.01
[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-100-107](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-100-107)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КЛАССА А500 С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FATIGUE STRENGTH OF A500 CLASS REINFORCEMENT WITH VARIOUS TYPES OF PERIODIC PROFILE

В. Д. ТЕРИН, канд. техн. наук
 Д. Е. КЛИМОВ
 А. А. КВАСНИКОВ, канд. техн. наук

Приведены результаты исследований усталостной прочности арматуры класса А500 по ГОСТ 34028-2016 с различными видами периодического профиля. Обобщены и систематизированы данные по результатам проводившихся ранее экспериментальных исследований усталостной прочности различных видов арматуры и установлены основные факторы, влияющие на выносливость. Получены экспериментальные данные по прочностным и деформационным характеристикам при статических и многоцикловых нагрузках арматуры класса А500С с различными видами периодического профиля. По результатам исследований даны предложения по улучшению характеристик арматуры и периодического профиля для повышения ее стойкости к многократно повторяющимся цикловым нагрузкам и внесению изменений в действующие нормативные документы.

The article presents the results of studies of the fatigue strength of A500 class reinforcement by GOST 34028-2016 with various types of periodic profile. The data on the results of previously conducted experimental studies of the fatigue strength of various types of reinforcement are generalized and systematized, and the main factors affecting fatigue are established. Experimental data on strength and deformation characteristics under static and high-cycle loads of A500C class reinforcement with various types of periodic profile have been obtained. Based on the research results, proposals were made to improve the characteristics of the reinforcement and the periodic profile to increase its resistance to repeated cyclic loads and to amend the current regulatory documents.

Ключевые слова:

Арматура, периодический профиль арматуры, предел выносливости, усталостная прочность

Keywords:

Endurance limit, fatigue strength, periodic profile of reinforcement, reinforcement

Одной из актуальных для строительной отрасли является возможность применения самого массового класса арматурного проката, производимого в РФ, в самых различных эксплуатационных условиях работы железобетонных конструкций.

При эксплуатации железобетонных конструкций, работающих под воздействием многократно повторяющихся нагрузок, при определенных условиях в них могут происходить процессы зарождения трещин в рабочей арматуре, их распространение и увеличение, с последующим разрушением арматуры и железобетонной конструкции в целом. В этой связи важно понимание природы зарождения трещин в арматуре при циклических эксплуатационных нагрузках, причин, условий и влияющих факторов для противодействия их возникновению и распространению. Это позволит обоснованно формулировать такие требования к арматурному прокату, которые гарантируют безаварийную эксплуатацию конструкций, работающих в условиях динамических и циклических воздействий, а также повысят эффективность применения арматуры в таких конструкциях.

В материаловедении усталость металла понимается как процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных (часто – циклических) напряжений, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин, их развитию и разрушению конструкции.

Усталостные разрушения возникают, когда материал загружается многократно ниже уровня его временного сопротивления, а во многих случаях – даже ниже предела текучести. Усталость численно измерить нельзя, и говорить об усталости, например, металла можно только тогда, когда уже произошло хрупкое разрушение материала или конструкции.

Свойство материала сопротивляться усталости, т. е. воспринимать циклические нагрузки без разрушения в указанное время либо за указанное число циклов нагружения называется выносливостью.

Важной характеристикой в вопросах оценки сопротивления усталости арматуры является значение предела выносливости. Он обычно определяется как наибольшая величина напряжений цикла, при которой не происходит усталостное разрушение образца после достаточно большого числа циклических нагружений.

Опыт подобных испытаний показывает, что если образец не разрушился до 10^6 - 10^7 циклов, то и при более длительном испытании он уже не разрушится. Поэтому указанное число циклов обычно принимают за базу испытаний и устанавливают то наибольшее значение максимального напряжения цикла, при котором образец не разрушается до базы испытаний. Это значение и принимают за предел выносливости [1]. Определение уровня напряжения в арматуре, который можно безопасно использовать, гарантируя при этом определенный срок службы конструкции, и является основной целью испытаний на усталость арматурного проката.

Образование усталостных трещин происходит в местах концентрации напряжений в металле. Понижают предел выносливости различные виды сварки, что связано с резким

изменением геометрической формы, микроструктуры стали и с возникновением остаточных напряжений. При упрочнении арматурной стали термической обработкой формируется неравновесная структура стали и возникают остаточные напряжения, что также отражается на усталостной прочности стержней. Однако экспериментальные исследования, проведенные в период освоения массового производства термомеханически упрочненной арматуры, не выявили влияния указанного фактора на предел выносливости [2].

Существенную концентрацию напряжений на поверхности арматуры при работе на циклические нагрузки создает периодический профиль, столь эффективный в отношении обеспечения ее совместной работы с бетоном.

Систематические отечественные экспериментальные исследования по оценке выносливости арматурного проката различных классов, выпущенного с учетом различных технологических изменений производства арматурного проката, и по влиянию геометрических параметров периодического профиля на усталостную прочность с возможностью их оптимизации не проводились с 80-х годов прошлого столетия. С тех пор произошли существенные изменения в области развития технологий производства арматурного проката – разливы стали, способов его упрочнения, использования слитинг-процесса и др. Были разработаны новые классы арматуры, виды периодических профилей, изменились способы нарезки канавок валков чистой клетки. Все эти изменения не позволяют полностью транспонировать результаты предыдущих исследований для расчета и применения самой востребованной арматуры класса А500 в железобетонных конструкциях, работающих под действием многократно повторяющихся нагрузок.

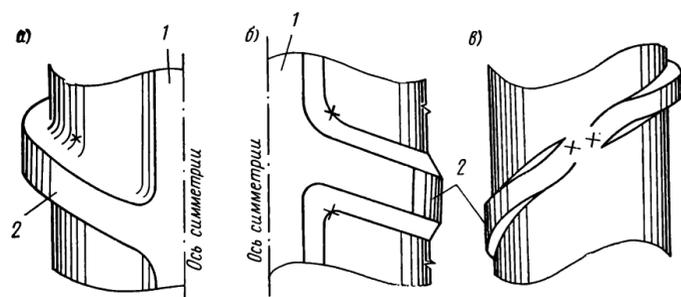


Рис. 1. Основные очаги усталостного разрушения стержневой арматуры периодического профиля:
 а – сопряжение поперечного ребра с сердечником стержня; б – сопряжение поперечного ребра с продольным ребром в плоскости, касательной к сердечнику стержня;
 в – сопряжение торца поперечного ребра с сердечником стержня;
 1 – продольное ребро; 2 – поперечное наклонное ребро

Ранее проведенными исследованиями [3] установлено, что основными местами концентрации напряжений в периодическом профиле арматуры являются:

– сопряжение поперечного ребра с телом стержня (рис. 1, а). Установлено, что этот вид усталостного разрушения является основной первопричиной и возможен во всех видах периодических профилей, имеющих поперечные наклонные ребра, независимо от наличия продольных ребер;

– пересечение поперечного наклонного ребра с продольным ребром (рис. 1, б). Как указывается, причиной возникновения усталостных напряжений здесь могут служить местные

напряжения, возникающие из-за резкого изменения сечения продольного ребра при его пересечении с наклонным ребром. Указанная причина для периодического профиля по ГОСТ 5781-61 [4] наблюдается достаточно часто;

– сопряжение концов поперечных наклонных ребер с телом стержня, где они сводятся на «нет» на боковую поверхность основного стержня или отделены от продольных ребер (рис. 1, в).

Поперечные ребра, с одной стороны, являются основным конструктивом для передачи усилий от бетона к арматуре и наоборот, но в то же время они же являются основной причиной концентрации напряжений, что, в свою очередь, является основным условием возникновения трещин усталости.

При образовании формы и параметров периодического профиля арматуры следует учитывать также, что сопротивление усталости повышается при уменьшении высоты поперечных ребер, увеличении радиуса перехода их к телу стержня, увеличении расстояния между поперечными ребрами и уменьшении их ширины. Угол наклона поперечных выступов к оси стержня не влияет на выносливость.

Предел выносливости арматурного проката определяют с помощью испытаний с циклическим нагружением серий одинаковых образцов с различной величиной одного из параметров нагружочного цикла: максимального или минимального напряжения или их соотношения. Значения изменяемого параметра задаются от большего к меньшему и определяют, при каком значении дальнейшее разрушение образцов не происходит. По полученным данным строят кривые усталости. Предел выносливости определяют как значение изменяемого параметра на горизонтальном участке получаемой кривой усталости.

Главными целями проведенных в 2020 г. исследований являлись:

– получение фактических значений пределов выносливости наиболее массового в применении арматурного проката класса А500 с периодическим профилем формы 1Ф (кольцевой) и 2Ф (серповидный) по ГОСТ 34028 [5];

– оценка степени влияния формы периодического профиля арматурного проката на его усталостную прочность для поиска путей оптимизации нормативных требований к арматурному прокату, работающему при многоцикловых нагрузках, и повышение эксплуатационной надежности железобетонных конструкций, подвергаемых динамическим и циклическим воздействиям.

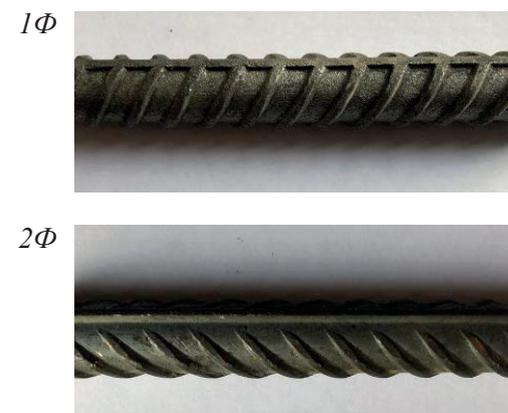


Рис. 2. Виды кольцевого (1Ф) и серповидного (2Ф) профилей по ГОСТ 34028

В результате проведенных работ были получены экспериментальные данные по прочностным и деформационным характеристикам при статических и многоцикловых нагрузках арматуры класса А500 с двумя основными видами периодического профиля (кольцевой и серповидный). Получены фактические значения пределов выносливости арматурного проката класса А500 при коэффициенте асимметрии цикла $\rho = 0,5$. Проведена оценка степени влияния некоторых факторов на величины пределов выносливости.

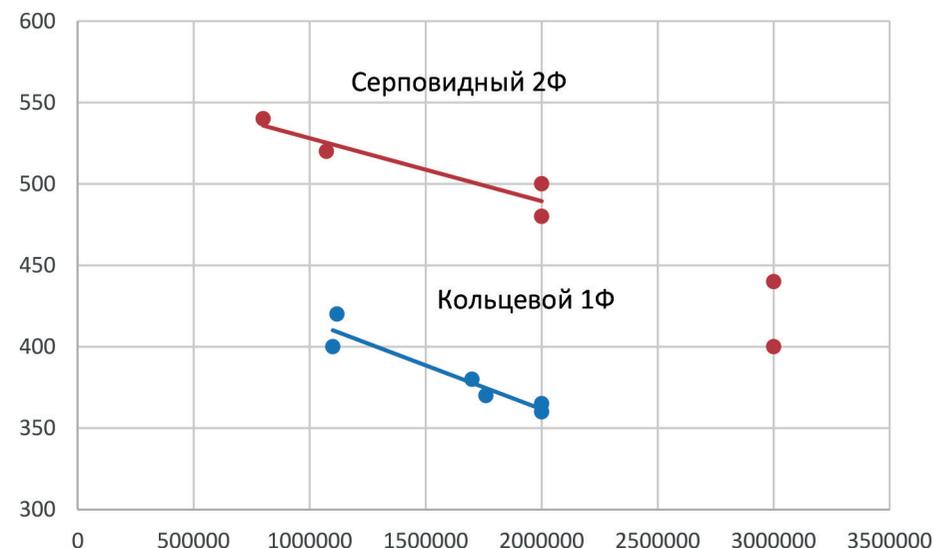


Рис. 3. График выносливости арматурного проката диаметром 12 мм

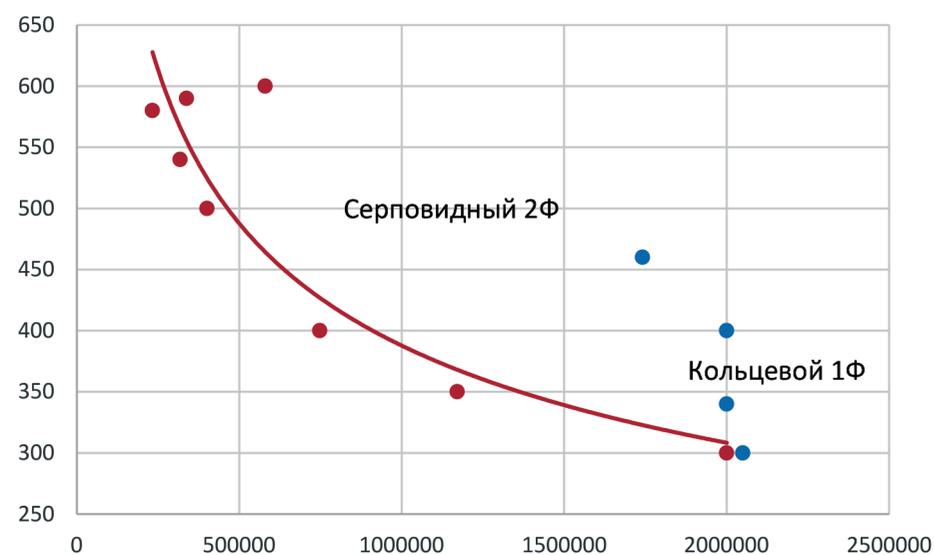


Рис. 4. График выносливости арматурного проката диаметром 20 мм

На рис. 3 и 4 представлены полученные зависимости значений максимальных напряжений цикла от числа пройденных циклов при постоянном коэффициенте асимметрии цикла $\rho = 0,5$ арматуры класса А500 диаметром 12 и 20 мм с периодическим профилем формы 1Ф и 2Ф по ГОСТ 34028. Численные значения пределов выносливости как максимального напряжения цикла при $\rho = 0,5$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения предела выносливости арматурного проката класса А500 и соотношение с исходными механическими свойствами

Диаметр / марка стали	Тип профиля	Коэффициент асимметрии цикла ρ	Предел выносливости σ_{max} , Н/мм ²	Среднее значение временного сопротивления арматуры σ_v , Н/мм ²	Соотношение σ_{max}/σ_v , %	Среднее значение предела текучести арматуры $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Соотношение $\sigma_{max}/\sigma_{0,2}$, %
12 25Г2С	1Ф	0,5	365	680	53,7	522	69,9
12 Ст3Гпс	2Ф	0,5	500	692	72,3	608	82,2
20 25Г2С	1Ф	0,5	340	678	50,1	528	64,4
20 Ст3Гпс	2Ф	0,5	300	689	43,5	583	51,5

Примечание: 1Ф – кольцевой периодический профиль, 2Ф – серповидный периодический профиль.

В результате проведения исследований усталостной прочности арматуры класса А500 с двумя видами периодического профиля выявлено следующее.

Предел выносливости арматурного проката класса А500 с серповидным периодическим профилем формы 2Ф для диаметра 12 мм получен выше как в абсолютных величинах, так и в относительных, чем предел выносливости арматурного проката с кольцевым периодическим профилем формы 1Ф. Соотношение предела выносливости с величиной временного сопротивления и предела текучести показывает, что прокат диаметром 12 мм с профилем формы Ф2 эффективнее сопротивляется многоцикловым нагрузкам, чем с профилем формы Ф1, что составляет 35% относительно временного сопротивления и 17% относительно предела текучести.

Результаты испытаний на выносливость арматурного проката 20 мм показывают, что предел выносливости арматуры с кольцевым периодическим профилем в данном случае получился выше на 25% относительно временного сопротивления и на 15% – относительно текучести, чем серповидного. И здесь прослеживаются несколько интересных моментов.

1. Арматура с кольцевым профилем в процессе многоцикловых испытаний существенно упрочнялась, повышая свой предел текучести на 5-10%, что обусловлено ее диаграммой растяжения и технологией ее изготовления. На арматуре с серповидным профилем такая большая величина повышения предела текучести не наблюдалась в связи отличиями в технологии производства. Эти данные получены последующим растяжением испытанных на выносливость образцов.

2. Некоторые параметры периодического профиля арматуры диаметром 20 мм обеих форм профиля имели существенные отличия. Так, высота поперечных ребер серповидного профиля 2Ф была на 40-50% больше, чем у кольцевого 1Ф. При этом значения высоты ребер на арматуре кольцевого профиля были либо на пределе минимально допустимых значений по ГОСТ 34028 [5] либо меньше требуемого. Кроме этого, кольцевой периодический профиль арматуры диаметром 20 мм отличался сглаженностью форм, что обусловлено прокаткой на существенно выработанных валках чистой клетки. На арматурном прокате диаметром 12 мм картина выглядела иначе. При одинаковой четкости элементов профиля высота ребер была существенно выше на арматуре с кольцевым периодическим профилем примерно на 50%.

3. Арматура с кольцевым периодическим профилем диаметром 20 мм имела частые обрывы в захватах испытательной машины. Значения пределов выносливости вычисляли суммированием числа циклов, полученных при повторных захватах образца. Высокая частота обрывов ставит под сомнение адекватность полученных значений предела выносливости арматуры диаметром 20 мм с профилем 1Ф.

Полученные данные позволяют предположить, что сглаживание переходов, являющихся концентраторами напряжений, может существенно повысить предел выносливости арматурного проката. Этого можно добиться, обеспечив соответствующее построение калибров прокатных валков и нормировав радиусы скругления мест перехода поперечных ребер в тело стержня, обеспечивающих адекватное сцепление арматуры с бетоном и их совместную работу.

При этом прослеживается тенденция снижения предела выносливости с повышением высоты поперечных ребер независимо от формы профиля.

Однозначные зависимости влияния формы периодического профиля на выносливость арматурного проката по полученным результатам не выявлены. Однако отмечено влияние некоторых факторов и параметров периодического профиля, оказывающих непосредственное влияние на величины пределов выносливости арматурного проката независимо от формы профиля.

На основании полученных результатов считаем необходимым проведение комплексных экспериментально-теоретических исследований с возможностью накопления данных для оптимизации параметров периодического профиля арматуры и изучение влияния современных технологий производства арматуры на ее усталостную прочность, определение фактических пределов выносливости арматуры класса А500 производства различных заводов РФ.

Определение пределов выносливости и актуальных значений коэффициентов условия работы для вычисления расчетных сопротивлений арматурного проката А500 в целях расчёта железобетонных конструкций на выносливость с указанной арматурой могло бы привести, с одной стороны, к экономии металла и материальных средств, а с другой – к повышению надёжности железобетонных конструкций при оптимизации параметров периодического профиля с закреплением необходимых требований в нормативных документах.

Данная проблема носит межотраслевой характер, поскольку в существенной степени затрагивает спектр железобетонных конструкций транспортного и гидротехнического строительства, что потребует внесения изменений и дополнений в СП 35.13330.2011 [6] и СП 41.13330.2012 [7].

Список литературы

1. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. С. 479-483.
2. *Мадатян С.А., Терин В.Д., Коневский В.П., Пану В.Н.* Механические свойства и усталостная прочность арматуры класса АтШС // Бетон и железобетон. 1983. №12. С. 28-29.
3. *Скоробогатов С.М.* Основы расчёта теории выносливости стержневой арматуры железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1976. 109 с.
4. ГОСТ 5781-61 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций.
5. ГОСТ 34028-2016 Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия.
6. СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы».
7. СП 41.13330.2012 «СНиП 2.06.08-87 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений».

Информация об авторах/Information about authors

Вячеслав Дмитриевич ТЕРИН, канд. техн. наук, руководитель центра новых видов арматуры, сварки и армирования железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Vyacheslav TERIN, Ph. D. (Engineering), Head of the Center for New Types of Fittings, Welding and Reinforcement of Reinforced Concrete of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: terin@bk.ru

тел.: +7(499) 174-76-14

Дмитрий Евгеньевич КЛИМОВ, научный сотрудник центра новых видов арматуры, сварки и армирования железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Dmitry KLIMOV, Researcher of the Center for New Types of Fittings, Welding and Reinforcement of Reinforced Concrete of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

тел.: +7(499) 174-76-96

Александр Анатольевич КВАСНИКОВ, канд. техн. наук, руководитель центра научно-технического обеспечения НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Alexander KVASNIKOV, Ph. D. (Engineering), Head of the Center for Scientific and Technical Support of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: a.a.kvasnikov@gmail.com