

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669.15-194
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-93-101



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ TRIP-СТАЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОТИВООБВАЛЬНЫХ КОЛЬЧУЖНЫХ СЕТОК

Константинов Д.В.¹, Корчунов А.Г.¹, Огнева Е.М.¹, Комкова Д.А.²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Защита транспортной и гражданской инфраструктуры в горных регионах от камнепадов и селей требует создания высокоэффективных инженерных заграждений. Традиционные кольчужные сетки из высокоуглеродистой стали часто достигают предела своей энергоемкости из-за низкой пластичности материала, что в условиях динамического удара приводит к локальному хрупкому разрушению колец и пробитию барьера. В этой связи актуальным является поиск новых материалов, способных сочетать высокую прочность с адаптивной пластичностью. **Цель работы.** Исследование и обоснование возможности применения сталей с эффектом пластичности, наведенной превращением (TRIP-сталей), для производства элементов противообвальных кольчужных сеток с целью повышения их энергопоглощающей способности. **Используемые методы.** Исследование проведено методом компьютерного моделирования в программном комплексе Abaqus. Разработана конечно-элементная динамическая модель взаимодействия жесткого индентора массой 300 кг с фрагментом кольчужной сетки при скоростях от 10 до 20 м/с. Проведено сравнительное моделирование поведения сетки из традиционной стали 80 и метастабильной стали TRIP700. Для описания TRIP-эффекта использована модель с учетом зависимости предела текучести и критериев разрушения (Ductile Damage) от скорости деформации. **Новизна.** Впервые предложена и обоснована концепция применения TRIP-сталей в метизном производстве для систем инженерной защиты. Установлено, что за счет фазового превращения аустенита в мартенсит в зонах концентрации напряжений реализуется механизм динамического упрочнения, предотвращающий преждевременную локализацию деформаций в узлах контакта колец. **Результат.** Установлено, что применение стали TRIP700 позволяет увеличить порог поглощаемой энергии конструкции более чем в 4 раза по сравнению с традиционными решениями. Показано, что в TRIP-стали превалирует механизм пластической диссипации энергии (ALLPD), обеспечивающий полную остановку объекта без значительной упругой отдачи, в то время как сталь 80 демонстрирует склонность к мгновенному разрушению при достижении критических скоростей удара. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют рекомендовать внедрение TRIP-сталей в производство высокопрочной проволоки для систем защиты от камнепадов. Использование предложенного материала позволяет создавать «самоадаптирующиеся» защитные барьеры с повышенным ресурсом надежности, способные эффективно гасить энергию удара даже при жестких схемах закрепления или отказе демпфирующих элементов анкерных систем.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, сталь с трансформационно-индуцированной пластичностью, кольчужные сетки, геотекстиль

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 25-29-20042 от 14.05.2025, <https://rscf.ru/project/25-29-20042/>) и финансовой поддержки Правительства Челябинской области (Соглашение № 30-2025-002767 от 07.07.2025).

© Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Комкова Д.А., 2026

Для цитирования

Оценка возможности применения TRIP-сталей в производстве противообвальных кольчужных сеток / Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Комкова Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 93-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-93-101>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE FEASIBILITY OF TRIP STEELS APPLICATION IN THE MANUFACTURING OF ROCKFALL PROTECTION RING-NET BARRIERS

Konstantinov D.V.¹, Korchunov A.G.¹, Ogneva E.M.¹, Komkova D.A.²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The protection of transport and civil infrastructure in mountainous regions against rockfalls and debris flows requires the development of highly efficient protective barrier systems. Conventional ring-net barriers manufactured from high-carbon steel often reach the limit of their energy absorption capacity due to the material's low ductility. Under dynamic impact loading, this frequently results in localized brittle fracture of the rings and subsequent barrier perforation. Therefore, the search for new materials capable of combining high strength with adaptive ductility is of considerable practical importance. **Objectives.** The aim of this study is to investigate and justify the feasibility of using Transformation-Induced Plasticity (TRIP) steels for the production of ring-net barrier components in order to enhance their energy absorption capacity. **Methods Applied.** The study has been conducted using computer simulation in the Abaqus. A finite-element dynamic model has been developed to simulate the interaction between a rigid indenter with a mass of 300 kg and a fragment of a ring-net barrier at impact velocities ranging from 10 to 20 m/s. Comparative simulations have been performed for barriers manufactured from conventional Grade 80 steel and metastable TRIP700 steel. To describe the TRIP effect, a constitutive model accounting for strain-rate-dependent yield strength and ductile damage criteria has been employed. **Originality.** For the first time, the concept of applying TRIP steels in wire-product manufacturing for engineering protection systems has been proposed and substantiated. It was established that the stress-induced transformation of retained austenite into martensite in regions of stress concentration provides a mechanism of dynamic strengthening, preventing premature strain localization at ring contact nodes. **Result.** The simulations demonstrated that the use of TRIP700 steel increases the energy absorption threshold of the structure by more than four times compared with conventional solutions. It has been shown that plastic energy dissipation (ALLPD) is the dominant energy absorption mechanism in TRIP steel, enabling complete arrest of the impacting object with minimal elastic rebound. In contrast, Grade 80 steel has exhibited a tendency toward instantaneous failure upon reaching critical impact velocities. **Practical Relevance.** The obtained results support the implementation of TRIP steels in the production of high-strength wire for rockfall protection systems. The proposed material enables the development of "self-adaptive" protective barriers with enhanced reliability and service life, capable of efficiently dissipating impact energy even under rigid anchoring conditions or in the event of damping element failure within anchor systems.

Keywords: computer simulation, transformation-induced plasticity steel, ring-net barriers, geotextiles

The study was funded by the Russian Science Foundation (agreement No. 25-29-20042 dated May 14, 2025, <https://rscf.ru/project/25-29-20042/>) and The Government of the Chelyabinsk Region (agreement No. 30-2025-002767 dated July 07, 2025).

For citation

Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Ogneva E.M., Komkova D.A. Assessment of the Feasibility of Trip Steels Application in the Manufacturing of Rockfall Protection Ring-Net Barriers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 93-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-93-101>

Введение

Проблема защиты инфраструктуры от камнепадов и селей остается критической для горных регионов с высоким риском чрезвычайных ситуаций. Это является одной из наиболее острых проблем инженерной геологии и гражданского строительства [1]. Одним из наиболее эффективных решений для перехвата объектов с высокой кинетической энергией (до 5000–8000 кДж) являются гибкие барьеры на основе кольчужных кольцевых сеток. Традиционно для изготовления противообвальных барьеров применяются кольчужные сетки из высокопрочной стальной проволоки (например, сталь 80) в виде колец из стальных

прутьев или канатов (как правило, с цинковым покрытием для защиты от агрессивной коррозии, характерной для данной области применения). Ключевым требованием к таким конструкциям является не только высокая разрывная нагрузка, но и способность к значительному энергопоглощению. В отличие от жестких конструкций, такие сетки способны к значительным пластическим и геометрическим деформациям, что позволяет плавно гасить энергию удара [2]. При этом следует отметить, что рядовые высокоуглеродистые стали эффективно работают в основном за счет геометрической податливости колец сетки, в то время как ресурс самого материала по пластичности

часто ограничен. Как показывают исследования [3], при высокоскоростном ударе в узлах контакта колец возникают значительные концентраторы напряжений, приводящие к локализации деформаций и преждевременному хрупкому разрушению материала.

В этом контексте перспективным направлением является применение сталей с эффектом пластичности, наведенной превращением (TRIP-стали). Фундаментальные основы этого класса материалов были заложены в работах [4], где было показано, что превращение остаточного аустенита в мартенсит в процессе деформирования позволяет одновременно достичь высокой прочности и исключительной пластичности. Применение TRIP-сталей в автомобильной промышленности доказало их превосходство в поглощении энергии удара [5-7]. Особый интерес представляет поведение TRIP-сталей при высоких скоростях деформации, характерных в том числе для камнепадов. Исследования [8, 9] и [10] подтверждают, что скоростная чувствительность TRIP-сталей способствует более равномерному распределению деформаций по объему материала, что может существенно повысить энергоемкость кольчужной сетки.

Несмотря на глубокую изученность TRIP-эффекта в листовом прокате для автопрома, вопросы применения таких сталей в метизном производстве остаются малоизученными, но перспективными. Современные исследования открывают широкие перспективы их применения в производстве метизов и длинномерных изделий (проволоки и прутков). В отличие от листов, где TRIP-эффект достигается сложной термомеханической обработкой [11] в линиях непрерывного отжига, при производстве высокопрочной проволоки фазовое превращение может инициироваться непосредственно в процессе волочения или последующей деформации готового изделия [12]. В работах [13, 14] рассматривается поведение высокопрочной стальной проволоки с метастабильным аустенитом. Было установлено, что частичное превращение аустенита в мартенсит при деформации прутка позволяет существенно повысить сопротивление материала микропластическим деформациям и увеличить предел выносливости. Это критически важно для метизов, работающих в условиях циклического или ударного нагружения, таких как пружины или элементы кольцевых сеток.

Особое значение для производства противообвальных барьеров имеет работа [15], указывающая на то, что в массивных изделиях круглого сечения распределение фаз происходит более равномерно, что снижает риск локального перенапряжения по сравнению с тонкими листами. Применение TRIP-сталей в производстве высокопрочного крепежа и проволочных канатов также подтверждает, что данный материал эффективно гасит энергию за счет «динамического упрочнения», что позволяет снизить металлоемкость конструкций без потери их защитных свойств. Авторы [16] обосновывают переход от обычных высокопрочных сталей к TRIP-сталям при производстве крепежа. Главная идея указанной рабо-

ты состоит в управляемом сохранении остаточного аустенита в готовом изделии. Это позволяет крепежу «подстраиваться» под нагрузки: если болт испытывает критический удар или импульсную нагрузку уже в составе конструкции, аустенит превращается в мартенсит, локально повышая прочность и предотвращая хрупкое разрушение. В работе [17] особое внимание уделено процессу проектирования маршрутов волочения проволоки с позиции оптимизации количества остаточного аустенита в микроструктуре на каждом этапе волочения. В работе [18] перспективность прикладного применения обозначенных энергопоглощающих свойств продемонстрирована даже при восстановлении деталей машиностроения.

Таким образом, целью представляемой статьи является проверка посредством компьютерного моделирования концептуальной возможности применения TRIP-сталей в производстве противообвальных кольчужных сеток, то есть сравнение в условиях, требующих высокого энергопоглощения, двух пограничных «философий» (высокая прочность против адаптируемой пластичности), которые ранее (около полувека назад) уже противоборствовали в области проектирования систем кузовной автомобильной безопасности.

Материалы и методы исследования

Для исследования динамического взаимодействия была разработана конечно-элементная модель кольчужной сетки размером 10×8 колец. Параметры кольца: внешний диаметр – 300 мм, диаметр поперечного сечения прутка – 20 мм. Индентор («булжжик») имел диаметр описанной окружности 1000 мм. Для учета инерционных характеристик индентор задавался как жесткое тело массой 300 кг, сосредоточенной в центре тяжести. Дискретизация модели выполнена с использованием восьмиузловых линейных гексаэдральных элементов с уменьшенным интегрированием (C3D8R). Плотность сетки в зоне контакта была выбрана таким образом, чтобы обеспечить минимум 4-6 элементов по диаметру сечения прутка для корректного описания градиента напряжений при изгибе. Общий вид сборки представлен на **рис. 1**.

В работе проводилось сравнительное моделирование двух типов сталей:

- Сталь 80: традиционная высокоуглеродистая сталь, моделируемая как упругопластическая среда с изотропным упрочнением.

- Сталь TRIP700: сталь с эффектом пластичности, наведенной превращением.

Для корректного отображения TRIP-эффекта в условиях динамического удара была использована модель табличного задания кривых текучести (Rate-Dependent Yielding). Свойства материала задавались набором кривых «напряжение — пластическая деформация» для фиксированных скоростей деформации: 0, 2, 20 и 200 с⁻¹. Это позволило учесть упрочнение материала, связанное не только с деформационным наклепом, но и с кинетикой образования мартенсита при различных скоростях нагружения.

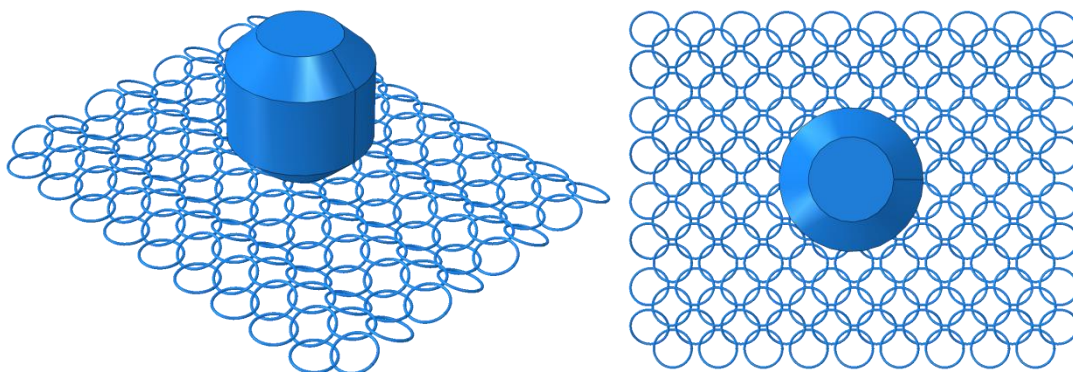


Рис. 1. Общий вид сборки рассматриваемой модели
Fig. 1. Common view of the model assembly

Для моделирования процесса разрыва колец использована модель накопления повреждений Ductile Damage. Эквивалентная пластическая деформация разрушения задавалась в зависимости от скорости деформации. При статической нагрузке значение составляло 0.35, снижаясь до 0.3 при скорости 200 с^{-1} . Параметр трехосности напряжений (Stress Triaxiality) был принят равным 0.33, что соответствует превалирующему состоянию одноосного растяжения в витках колец при ударе. После достижения критерия инициации разрушения деградация жесткости элементов описывалась параметром Damage Evolution со значением энергии разрушения (или смещения) 1.5, что обеспечивает численный учет вязкого характера разрушения TRIP-стали и предотвращает мгновенную потерю несущей способности элемента.

Для стали 80 деформация разрушения задана на уровне 0.05. Это в 7 раз меньше, чем у TRIP-стали

(0.35). Такая низкая пластичность характерна для высокоуглеродистых сталей с высоким пределом прочности, работающих в условиях динамического удара. Damage Evolution принят равным 0.15. Малое значение этого параметра указывает на резкое, практически мгновенное падение несущей способности кольца после появления первых микротрещин (хрупкий характер разрушения при самом неблагоприятном сценарии нагружения). Значение 0.05 наглядно подчеркивает чувствительность к концентраторам, так как в реальной кольчужной сетке из стали 80 кольца часто разрушаются именно из-за хрупкости.

Полученные результаты и их обсуждение

Анализ энергетического баланса для камня весом 300 кг на скорости 10 м/с (рис. 2, 3) выявил принципиальные различия в работе защитных экранов.

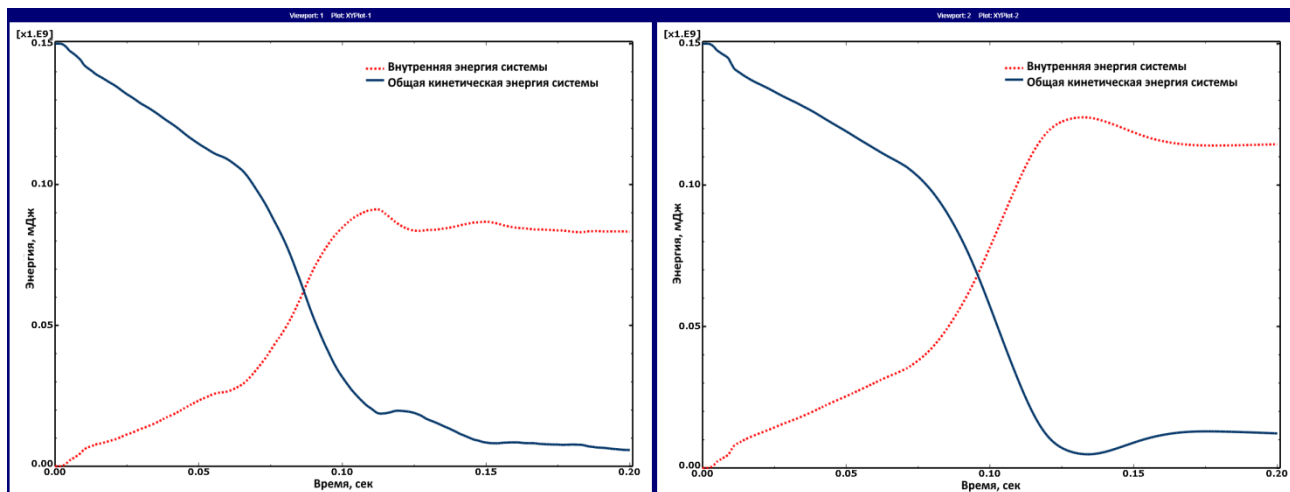


Рис. 2. График изменения во времени общей внутренней энергии системы (красная линия ALLIE) и общей кинетической энергии системы (синяя линия ALLKE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 10 м/с

Fig. 2. Time history graph of the total internal energy (red line ALLIE) and the total kinetic energy (blue line ALLKE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 10 m/s

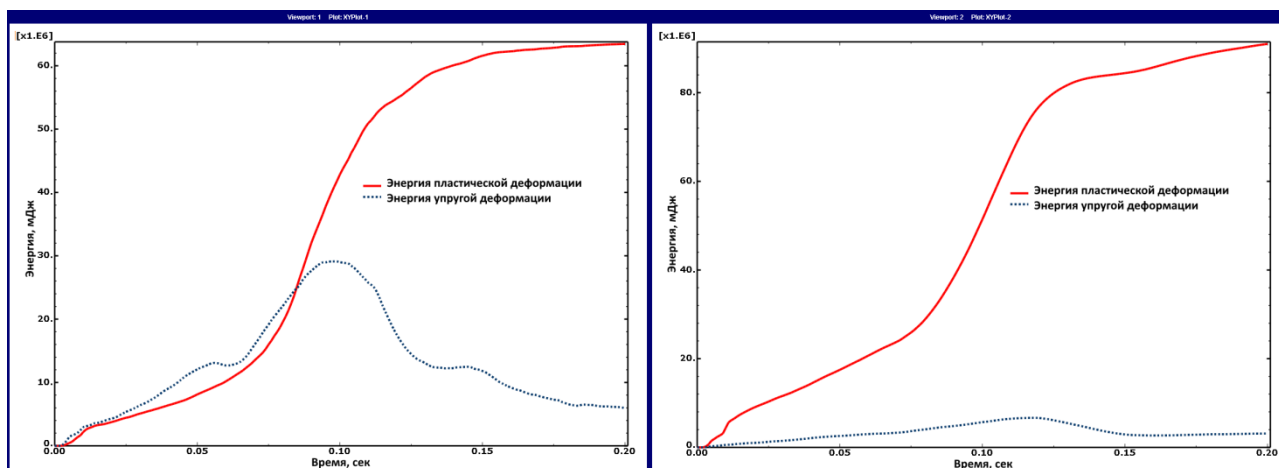


Рис. 3. График изменения во времени общей работы пластической деформации системы (красная линия ALLPD) и общей упругой деформации системы (синяя линия ALLSE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 10 м/с

Fig. 3. Time history graph of the total plastic strain (red line ALLPD) and the total elastic strain (blue line ALLSE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 10 m/s

В модели со сталью 80 наблюдается преждевременный выход кривой внутренней энергии (ALLIE - Internal Energy) на плато, что коррелирует с моментом разрушения критического числа колец и последующим пробитием сетки (остаточная кинетическая энергия камня отлична от нуля). В свою очередь, сетка из TRIP-стали демонстрирует выраженную стадию пластического деформирования. Пиковое значение внутренней энергии в данном случае выше, чем у традиционной стали 80. Характер кривой ALLKE (кинетическая энергия) свидетельствует о полной остановке индентора к моменту времени $t = 0,12$ с (рис. 4).

Таким образом, TRIP-сталь реализует свой потенциал пластичности, обеспечивая более высокую

энергоёмкость конструкции при идентичных геометрических параметрах. На правом графике виден небольшой пик на красной кривой в конце и последующий спад. Это может быть связано с упругой отдачей сетки после остановки камня, то есть эффектом демпфирования и частичного возврата упругой энергии. Сталь 80 аккумулирует значительную долю энергии в виде упругих деформаций (ALLSE), что создает высокие динамические нагрузки на анкеры системы и увеличивает риск рикошета. Для TRIP-стали, наоборот, характерно подавляющее преобладание пластической диссипации (ALLPD) над упругой энергией (ALLSE). Это свидетельствует о высокой демпфирующей способности материала, позволяющей гасить удар практически без упругой отдачи.

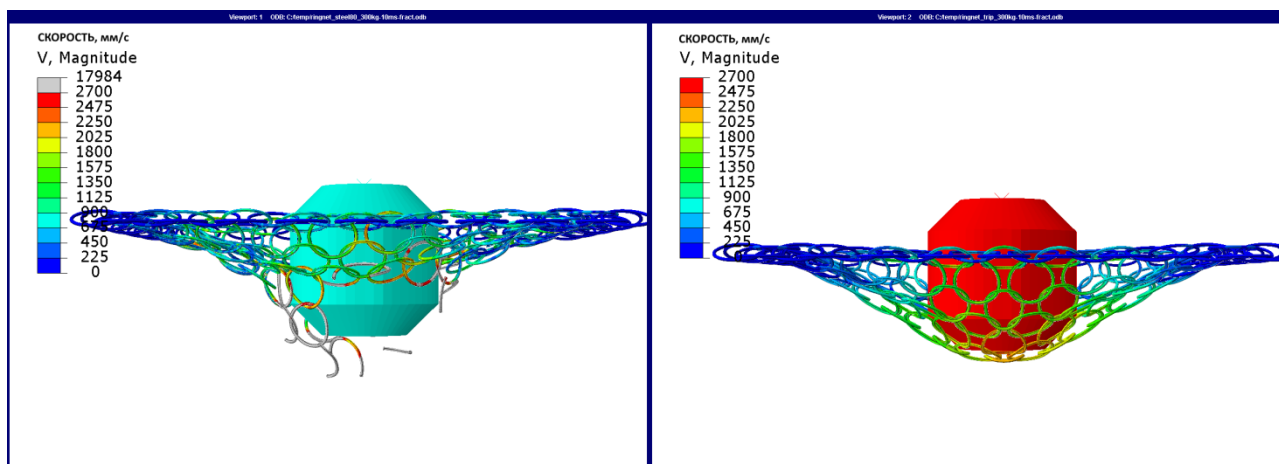


Рис. 4. Распределение амплитудных скоростей (мм/с) в конце расчета для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для изначальной скорости индентора 10 м/с

Fig. 4. Velocities distribution (mm/s) at the end of the calculation for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) with initial indenter velocity 10 m/s

На **рис. 5** в случае стали 80 кинетическая энергия (ALLKE) падает лишь наполовину и замирает на уровне 0.17. То есть в данном случае сетка была пробита практически мгновенно. Индентор улетел, сохранив большую часть скорости. Сталь 80 при такой жесткой фиксации просто «срезается» о границы или в месте контакта. С применением TRIP-стали кривая ALLKE практически касается нуля. Камень практически остановлен, но есть небольшой «хвост» остаточной энергии. Внутренняя энергия (ALLIE) выросла до 0.28, что почти в 3 раза выше, чем у стали 80. На примере этого случая стоит отметить, что принятая в данной работе расчетная схема с жесткой фиксацией граничных колец создает максимально неблагоприятное напряженное состояние, не учитывающее податливость анкерных систем реальных барьеров. Тем не менее именно в таких своего рода «утрированных» условиях преимущество TRIP-стали проявляется наиболее ярко и наглядно. В реальных условиях наличие демпферов на анкерах еще сильнее растянет процесс во времени, что даст TRIP-эффекту еще больше возможностей для реализации. При скорости удара 15 м/с сетка из стали 80 демонстрирует хрупкий характер разрушения, не успевая включить в работу периферийные участки. В то же время TRIP-сталь за счет высокого ресурса пластичности и динамического упрочнения успевает диссипировать около 90% кинетической энергии индентора. Это позволяет предположить, что в составе реальных конструкций с демпфирующими элементами применение TRIP-сталей обеспечит кратный рост надежности при экстремальных нагрузках.

Анализ графиков для скорости 20 м/с (**рис. 6**) показал, что для сетки из стали 80 кинетическая энергия (ALLKE) практически не снижается. Булыжник «пролетает» сквозь сетку, потеряв лишь 20% своей энер-

гии (с 0.6 до 0.45). В это же время внутренняя энергия (ALLIE) остается на крайне низком уровне. Таким образом, из-за высокой скорости удара и низкой пластичности (0.05) кольца в зоне контакта разрушаются мгновенно, не успевая передать нагрузку на остальную часть полотна. Происходит локальное пробитие. При этом TRIP-сталь снижает кинетическую энергию практически до нуля. Сетка смогла остановить объект, летящий на скорости 72 км/ч, несмотря на жесткое закрепление границ. Внутренняя энергия (ALLIE) системы в данном случае достигает достаточно высоких значений (около 0.5 на графике), то есть материал в зоне контакта не разрушается сразу, а начинает интенсивно упрочняться и растягиваться, вовлекая в работу соседние кольца. Сетка работает как единое целое, превращая всю кинетическую энергию булыжника в работу пластической деформации. Несмотря на экстремальные условия и жесткую фиксацию контура, за счет высокого значения энергии разрушения и способности к динамическому упрочнению сетка обеспечивает полную остановку объекта. Значение внутренней энергии (Internal Energy) в этом случае в 5 раз превышает показатели стали 80. Это доказывает, что применение TRIP-сталей позволяет перевести механизм взаимодействия из локального разрушения в общее деформирование всей системы, что является ключевым фактором живучести противобальных барьеров.

Ввиду прямой экспоненциальной зависимости доли мартенсита от эквивалентной пластической деформации зоны максимального упрочнения полностью совпадают с областями локализации PEEQ (в соответствии с моделью Олсона-Коэна (Olson-Cohen model)), продемонстрированными на **рис. 7** (нулевые значения для наглядности исключены из визуализации).

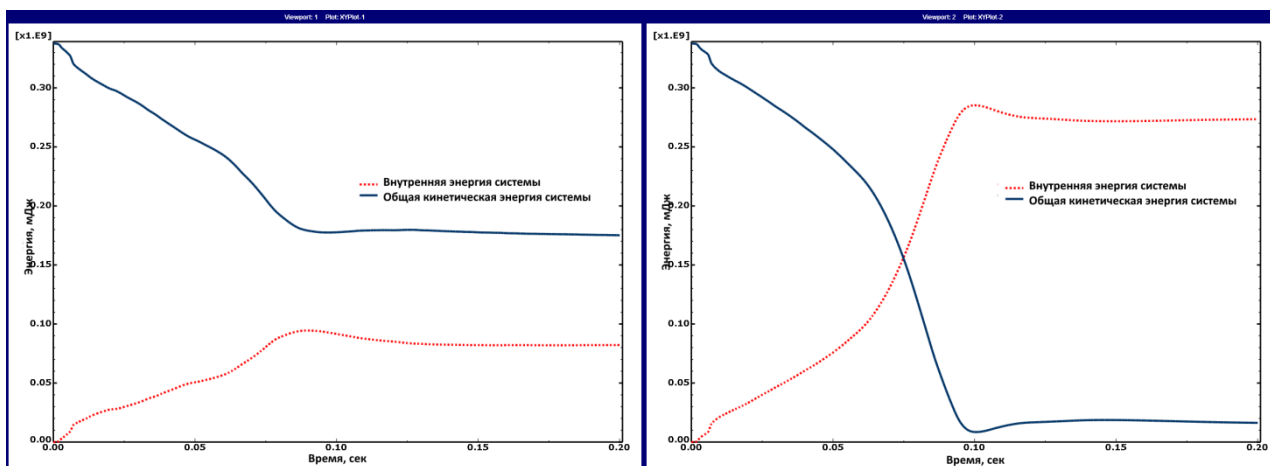


Рис. 5. График изменения во времени общей внутренней энергии системы (красная линия ALLIE) и общей кинетической энергии системы (синяя линия ALLKE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 15 м/с

Fig. 5. Time history graph of the total internal energy (red line ALLIE) and the total kinetic energy (blue line ALLKE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 15 m/s

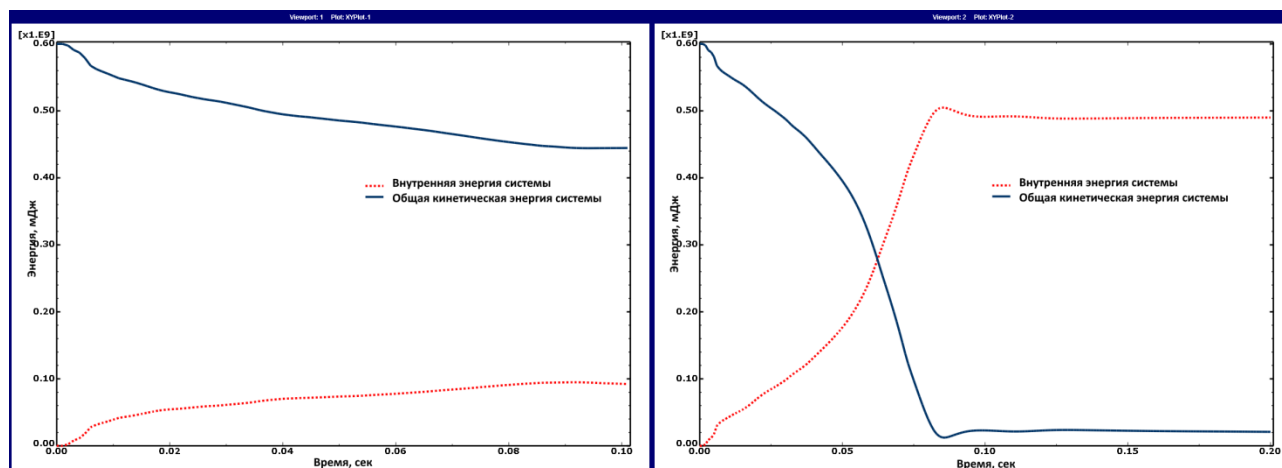


Рис. 6. График изменения во времени общей внутренней энергии системы (красная линия ALLIE) и общей кинетической энергии системы (синяя линия ALLKE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 20 м/с

Fig. 6. Time history graph of the total internal energy (red line ALLIE) and the total kinetic energy (blue line ALLKE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 20 m/s

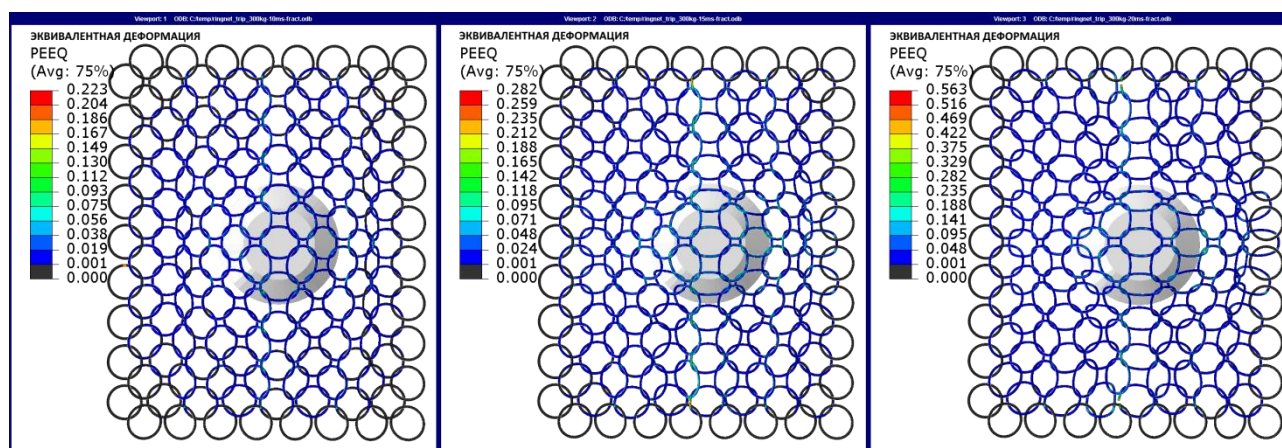


Рис. 7. Распределение эквивалентной деформации в конце расчета для сетки из стали TRIP700 для изначальной скорости индентора (слева-направо) 10, 15, 20 м/с

Fig. 7. Equivalent strain distribution at the end of the calculation for TRIP700 steel ring-net barriers for initial indenter velocity (from left to right) of 10, 15, 20 m/s

Сравнительный анализ полей эквивалентных деформаций и концентрации мартенситной фазы подтверждает адаптивный характер поведения TRIP-стали. Установлено, что фазовое превращение локализуется в зонах максимального градиента деформаций у границ закрепления сетки. Это обеспечивает локальное повышение несущей способности именно в тех узлах, которые являются критическими для целостности всей конструкции при высокоскоростном ударе.

Заключение

Таким образом, применение стали TRIP700 вместо стали 80 позволяет повысить порог поглощаемой энергии сетки более чем в 4 раза (с 15 до 60 кДж) в условиях цифрового эксперимента с жестким закреп-

лением. Установлено, что TRIP-эффект эффективно предотвращает локализацию деформаций при высоких скоростях удара (до 20 м/с), обеспечивая вовлечение всей площади сетки в процесс диссипации энергии. Следовательно, можно сделать вывод, что теоретически использование TRIP-сталей в метизном производстве для систем защиты от камнепадов позволяет существенно снизить риск пробития барьера при сверхнормативных нагрузках, даже без учета работы демпфирующих анкерных систем. Смежным преимуществом в данном случае является тот факт, что TRIP-сталь позволяет эффективнее использовать металлоемкость сетки. При динамическом ударе (20 м/с) сталь 80 не успевает проявить свои упругие свойства, и локальное превышение предела прочности ведет к лавинообразному разрушению. Для стали

80 критически важна работа анкерной системы, а TRIP-сталь в условиях представленного цифрового эксперимента проявила себя как «самодостаточный» демпфирующий материал, который может спасти конструкцию, даже если анкеры сработали некорректно или они установлены слишком жестко.

При этом важно отметить, что целью исследования не являлась замена действующих систем с применением высокоуглеродистой стали. В работе проводилось сравнение лишь еще одной дополнительной альтернативной стратегии защиты, которая наиболее эффективно может раскрыться именно в комбинации с действующими средствами.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение гибридных структур, например, сочетающих кольца из различных марок стали либо многослойные барьеры, где каждый слой выполняет наиболее пригодную для себя эксплуатационную задачу.

Список источников

1. Rockfall characterisation and structural protection – a review / Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W. and Jaboyedoff M. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011, no. 11, 2617–2651.
2. Grassl. H. Design of rockfall protection systems : diss. ... Dr. sc. techn. Zurich: ETH Zurich. 2002. 134 p.
3. Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: from the local scale to the structure scale / Bertrand D., Trad A., Limam A. et al. // Rock Mech Rock Eng. 2012, no. 45, pp. 885–900.
4. The enhancement of ductility on high-strength steel / Zaccay V.F., Parker E.R., Fahr D., et al. // Transactions of Applied Structures Mechanics. 1967, no. 60, pp. 252-258.
5. Bleck W., Xiaofei Guo, Yan Ma. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels // Steel Research International. 2017, no. 88(10), 1700218.
6. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review // Materials Science and Engineering: A. 2020, 795, 140023.
7. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application / Grassel O., Krüger L., Frommeyer G., Meyer L. W. // International Journal of Plasticity. 2000, vol. 16, no. 10–11, pp. 1391-1409.
8. On the sources of work hardening in multiphase steels assisted by transformation-induced plasticity / Jacques P., Furnémont Q., Mertens A., Delannay F. // Philosophical Magazine A. 2001, vol. 81, no. 7, pp. 1789-1812.
9. Константинов Д.В., Огнева Е.М., Корчунов А.Г. Перспективы стали с ТРИП-эффектом в производстве пенометаллических изделий // Механическое оборудование металлургических заводов. 2025. № 2(25). С. 31-37.
10. The effect of strain-induced martensitic transformation on mechanical properties of TRIP steel / Dan W.J., Li S.H., Zhang W.G., Lin Z.Q. // Materials & Design. 2008, vol. 29, no. 3, pp. 604-612.
11. Полякова М.А., Извеков Ю.А. Описание пластической деформации многофазных сталей в процессе термомо-

формационной обработки с учетом изменения фазового состава // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 21-25.

12. Heller W., Bleck W., Ohlert J. Development of high-strength wire rod with improved ductility by using the TRIP effect // Stahl und Eisen. 2004, vol. 124, no. 1, pp. 31–37.
13. Shen Y. Z., Kim J. M., Kim S. J. Mechanical properties and TRIP effect of a metastable austenitic steel wire // Materials Letters. 2012, no. 85, pp. 71–73.
14. Effect of cold drawing strain on the microstructure and mechanical properties of TRIP-aided steel wires / J. J. Zhu, Y. Z. Shen, J. M. Kim, S. J. Kim // Journal of Iron and Steel Research International. 2014, vol. 21, no. 8, pp. 783–788.
15. Fonstein N. Advanced high strength sheet steels: physical metallurgy, design, processing, and properties. Cham: Springer International Publishing, 2015. 395 p.
16. Мультимасштабное компьютерное моделирование производства и эксплуатации самоадаптирующегося крепежа из стали с трип-эффектом / А. Г. Корчунов, Д. В. Константинов, Е. М. Огнева [и др.] // Черные металлы. 2025. № 11. С. 27–33.
17. Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Огнева Е.М. Моделирование структурообразования стали с трип-эффектом в процессе многократного волочения проволоки // Черные металлы. 2026. № 2. С. 62–67.
18. Константинов Д.В., Шекшеев М.А., Полякова М.А. Восстановление деталей машин лазерной наплавкой порошка TRIP-стали и компьютерное моделирование их обработки и эксплуатации // Механическое оборудование металлургических заводов. 2025. №1(25). С. 11-16.

References

1. Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M. Rockfall characterisation and structural protection - a review. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011;11:2617-2651.
2. H. Grassl. Design of rockfall protection systems : diss. ... Dr. sc. techn. Grassl Hans. Zurich: ETH Zurich, 2002. 134.
3. Bertrand D., Trad A., Limam A. et al. Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: from the local scale to the structure scale. Rock Mech Rock Eng. 2012;45:885-900.
4. Zaccay V.F., Parker E.R., Fahr D. et al. The enhancement of ductility on high-strength steel. Transactions of Applied Structures Mechanics. 1967;60:252-258.
5. Bleck W., Xiaofei Guo, Yan Ma. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. Steel Research International. 2017;88(10):1700218.
6. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review. Materials Science and Engineering: A. 2020;795:140023.
7. Grassel O., Krüger L., Frommeyer G., Meyer L. W. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application. International Journal of Plasticity. 2000;16(10-11):1391-1409.
8. Jacques P., Furnémont Q., Mertens A., Delannay F. On the sources of work hardening in multiphase steels assisted by

- transformation-induced plasticity. *Philosophical Magazine A*. 2001;81(7):1789-1812.
9. Konstantinov D.V., Ogneva E.M., Korchunov A.G. Prospects of trip steel in the production of metallic foam products. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2025;(2(25)):31-37
 10. Dan W.J., Li S.H., Zhang W.G., Lin Z.Q. The effect of strain-induced martensitic transformation on mechanical properties of TRIP steel. *Materials & Design*. 2008;29(3):604-612.
 11. Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Description of plastic deformation of multiphase steels during thermodeformation treatment taking into account the change in phase composition. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025;54(3):21-25. (In Russ.)
 12. Heller W., Bleck W., Ohlert J. Development of high-strength wire rod with improved ductility by using the TRIP effect. *Stahl und Eisen*. 2004;124(1):31-37.
 13. Shen Y.Z., Kim J.M., Kim S.J. Mechanical properties and TRIP effect of a metastable austenitic steel wire. *Materials Letters*. 2012;85:71-73.
 14. Zhu J.J., Shen Y.Z., Kim J.M., Kim S.J. Effect of cold drawing strain on the microstructure and mechanical properties of TRIP-aided steel wires. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014;21(8):783-788.
 15. Fonstein N. Advanced high strength sheet steels: physical metallurgy, design, processing, and properties. Cham: Springer International Publishing, 2015, 395 p.
 16. Korchunov A.G., Konstantinov D.V., Ogneva E.M. et al. Multiscale computer simulation of production and operation of self-adapting TRIP-steel fasteners. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2025;(11):27-33. (In Russ.)
 17. Korchunov A.G., Konstantinov D.V., Ogneva E.M. Modeling structure formation in TRIP steel during multiple wire drawing. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2026;(2):62-67.
 18. Konstantinov D.V., Shekshuev M.A., Polyakova M.A. Restoration of machine parts by laser surfacing of trip steel powder and computer modeling of their processing and operation. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2025;(1(25)):11-16.

Поступила 07.05.2026; принята к публикации 18.05.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 07/05/2026; revised 18/05/2026; published 30/06/2026

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: agkorchunov@mail.ru. ORCID 0000-0002-2844-8283

Огнева Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: fekla_med@mail.ru. ORCID 0000-0003-2893-7412

Комкова Дарья Аркадьевна – научный сотрудник,
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
E-mail: komkova_d@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-5252-8913

Dmitry V. Konstantinov – PhD (Eng.), Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Alexey G. Korchunov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: agkorchunov@mail.ru. ORCID 0000-0002-2844-8283

Ekaterina M. Ogneva – PhD (Eng.), Senior Lecturer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: fekla_med@mail.ru. ORCID 0000-0003-2893-7412

Daria A. Komkova – Researcher
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia.
E-mail: komkova_d@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-5252-8913