

А.К. Мозалевская

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. *Представлены результаты исследований, посвященных оценке современного состояния разработок в направлении оценки качества поверхностного слоя различных материалов с учетом теоретических и практических исследований распределения остаточных напряжений в исследуемых образцах различной геометрии. Проведен сравнительный обзор способов и средств определения остаточных напряжений. Проведена оценка современных технологий оценки наличия остаточных напряжений применительно к деталям широкой номенклатуры применения. Приведена полная классификация всех методов определения остаточных напряжений с учетом технологических аспектов и глубины определения. Показаны различные методы разрушающего определения остаточных напряжений с учетом типовых расчетных схем и применяемых выражений. Представлена детализация основных методов разрушающего контроля остаточных напряжений и обобщен вывод о неразрушающих методах определения.*

Ключевые слова: *остаточные напряжения, метод конечных элементов, численное моделирование.*

¹*Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, Russian Federation*

¹*Irkutsk state transport university, Irkutsk, Russian Federation*

FEATURES OF DETERMINING RESIDUAL STRESSES DEPENDING ON THE NATURE OF THE MATERIAL UNDER STUDY

Abstract. *The results of research devoted to assessing the current state of developments in the field of assessing the quality of the surface layer of various materials, taking into account theoretical and practical studies of the distribution of residual stresses in the studied samples of various geometries, are presented. A comparative review of methods and means of determining residual stresses has been carried out. An assessment of modern technologies for assessing the presence of residual stresses has been carried out in relation to details of a wide range of applications. A complete classification of all methods for determining residual stresses is given, taking into account technological aspects and the depth of determination. Various methods of destructive determination of residual stresses are shown, taking into account typical calculation schemes and applied expressions. A detailed description of the main methods of destructive testing of residual stresses and a general conclusion on non-destructive methods of determination are presented.*

Keywords: *residual stresses, finite element method, numerical modeling.*

Введение

Изготовление готовой продукции, характерной для тяжелого машиностроения, связано с оценкой качества готовых деталей. Следует отметить, что одним из основных направлений в этом случае является определение поверхностных напряжений в полученных образцах [1, 2]. Также необходимо учитывать особенности влияния вибрационных процессов на реализацию технологии изготовления готовых изделий [3, 4], в том числе с учетом возможностей ударных воздействий и возникновения случайных процессов [5 – 7].

Повышение качества готовой продукции крайне важно в условиях враждебной санкционной политики, реализуемой прямыми конкурентами. В связи с этим необходимо создание всеобъемлющего свода обзорных рекомендаций по актуальным направлениям современных технологий определения остаточных напряжений применительно к соответствующему классу изделий. В предлагаемой статье проведен сравнительный обзор методологии определения остаточных напряжений.

В предлагаемой статье проведен сравнительный обзор методологии определения остаточных напряжений.

Материалы и методы

В современном исследовании методов выявления остаточных напряжений выделяют две основные категории: разрушающие и неразрушающие. К первым относятся методы, предполагающие разрушение образца, такие как механические и химические способы, тогда как ко вторым — методы, основанные на измерении физических характеристик материала с помощью специализированного оборудования (см. рис. 1).

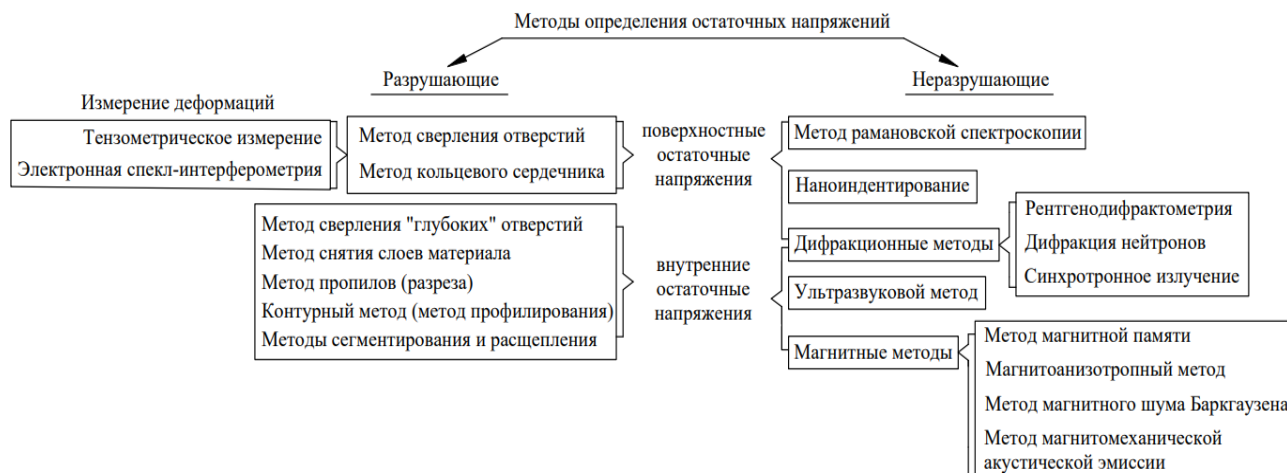


Рис. 1 - Сравнительный обзор существующих технологий [5]

Разрушающие методы

Основа их действия заключается в том, что при выполнении разреза и обнажении поверхности происходит изменение состояния остаточных напряжений (см. рис. 2).

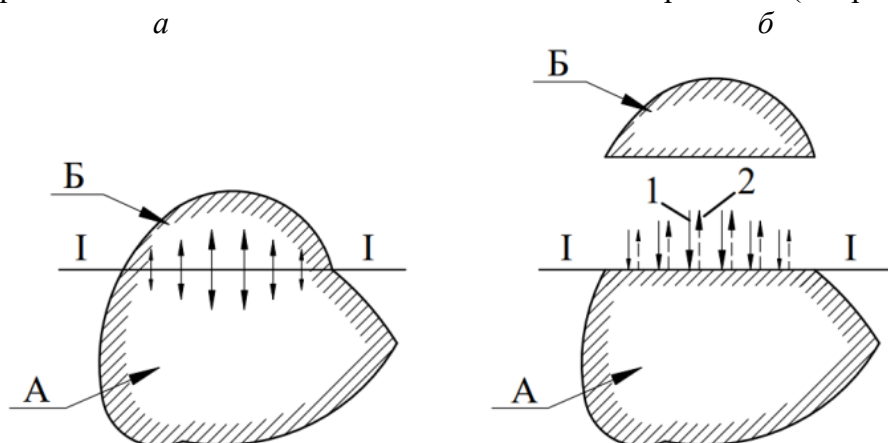


Рис. 2 - Общая принципиальная схема оценки наличия остаточных напряжений при использовании методов разрушающего определения

Для этого удаляют часть материала, после чего математически определяют остаточные напряжения, исходя из деформаций и смещений в области разреза, применимых к упругим и пластическим телам [1].

Также применяются методы сегментирования и расщепления для оценки остаточных напряжений при изготовлении деталей простой формы (см. рис. 3).

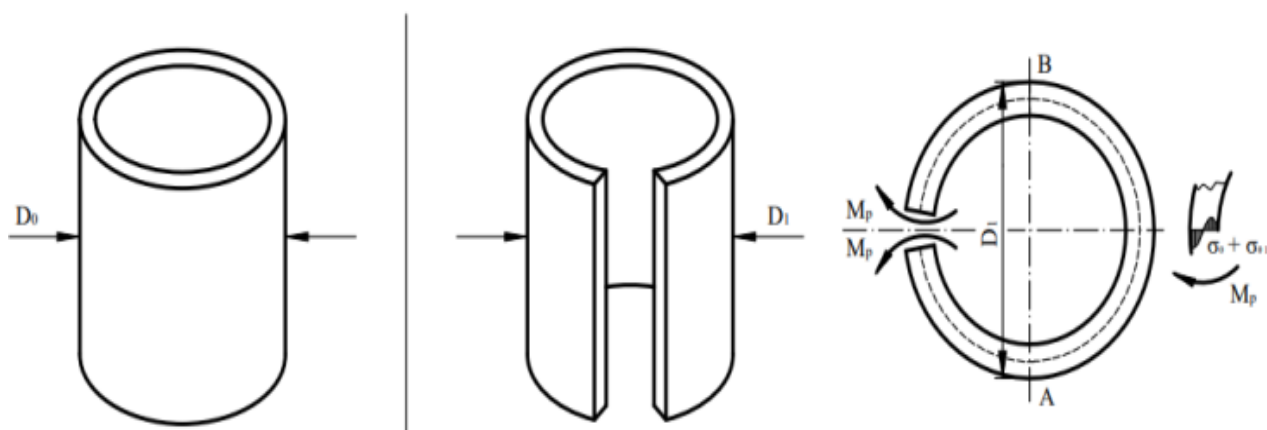


Рис. 3 - Метод сегментирования

После получения экспериментальных данных величина напряжений может быть найдена следующим образом:

$$\sigma_{res}^{\min} = \pm \frac{Et}{(1-\nu^2)} \left(\frac{D_1 + D_0}{D_1 D_0} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{res}^{\max} = \pm \frac{Et}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{R_1 + R_0}{R_1 R_0} \right), \quad (2)$$

где σ_{res}^{\min} , σ_{res}^{\max} – минимальное и максимальное остаточное окружное напряжение на поверхности трубы, E – модуль Юнга, t – толщина трубы, ν – коэффициент Пуассона, D_0 – средний наружный диаметр трубы до разделения, D_1 – средний наружный диаметр трубы после разделения, R_0 – средний внешний радиус до разделения, R_1 – средний внешний радиус после разделения.

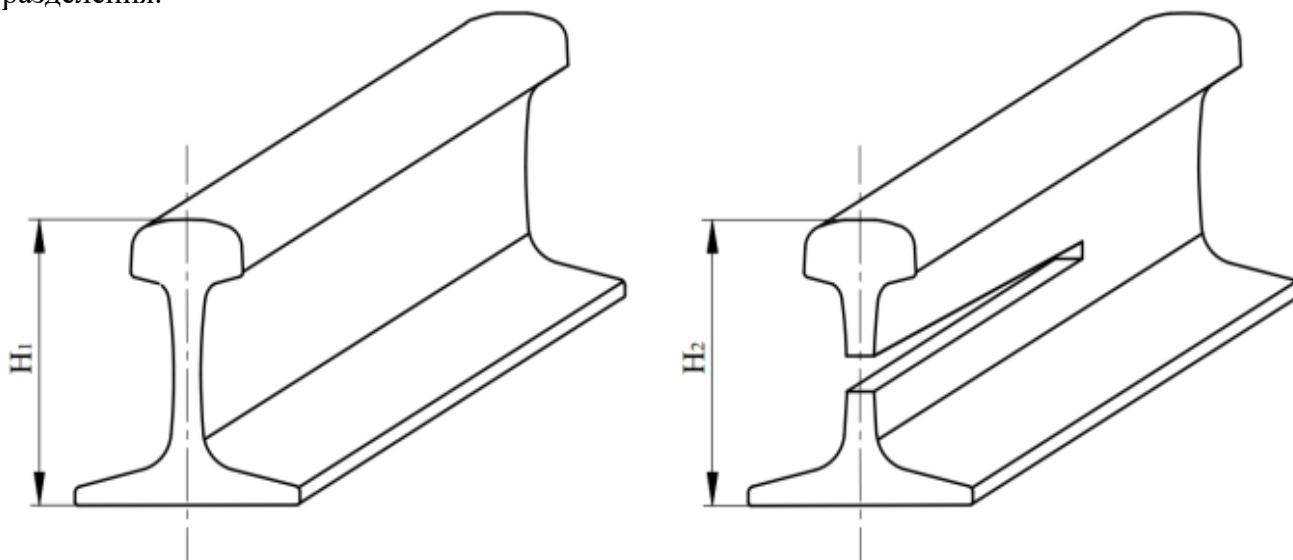


Рис. 4 - Оценка наличия остаточных напряжений в железнодорожном рельсе

Еще одним подходом является сверление малых отверстий на поверхности образца (см. рис. 5), что позволяет определить напряжения по измеренным деформациям.

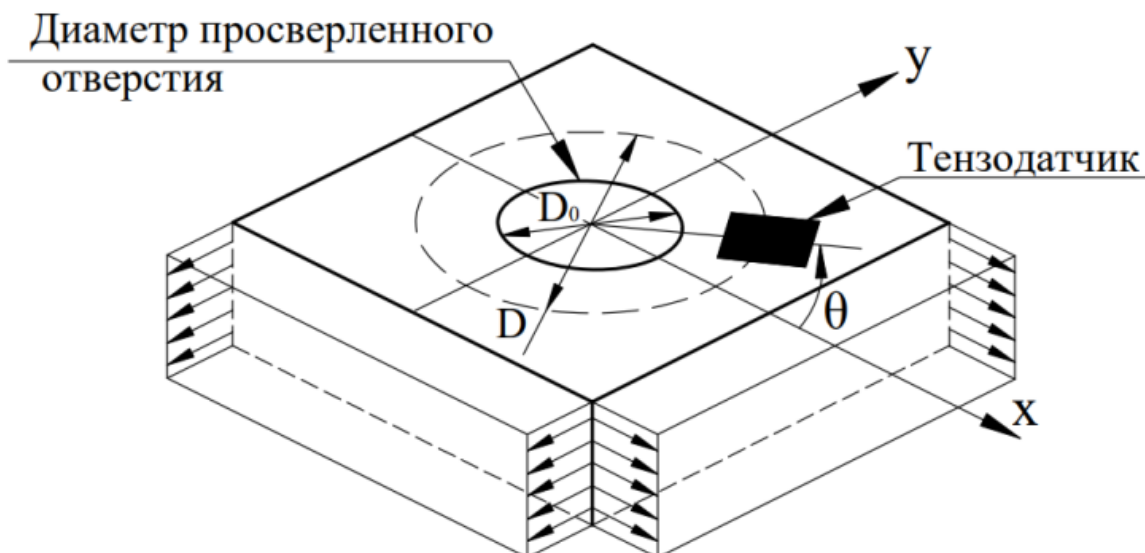


Рис. 5 - Метод сверления отверстий

На основании полученных результатов определяются деформации:

$$\varepsilon = \frac{1+\nu}{E}(-\bar{a})\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right) + \frac{1}{E}(-\bar{b})\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\cos(\theta) + \frac{1}{E}(-\bar{b})\tau_{xy}\sin(\theta). \quad (3)$$

Данный способ считается одним из наиболее популярных для измерения остаточных напряжений на глубине до 2 мм.

Метод "глубокого" сверления — это развитие предыдущего метода, при котором сверлится контрольное отверстие диаметром 1,5 — 5 мм полностью через толщину детали (см. рис. 6). Связь между изменением диаметра отверстия и остаточными напряжениями выражается формулой:

$$\varepsilon(\theta) = \frac{\Delta d(\theta)}{d_0(\theta)}, \quad (4)$$

где Δd — изменение диаметра отверстия, а d_0 — исходный диаметр.

В детализированном виде формула примет вид

$$\varepsilon(\theta) = \frac{1}{E}(\sigma_{xx}f(\theta) + \sigma_{yy}g(\theta) + \tau_{xy}h(\theta)), \quad (5)$$

где σ_{xx} , σ_{yy} и τ_{xy} — компоненты тензора напряжений, E — модуль Юнга (изотропного) материала.

Дополнительные соотношения определяются следующим образом:

$$f(\theta) = 1 + \cos(2\theta), g(\theta) = 1 - \cos(2\theta), h(\theta) = 4\sin(2\theta). \quad (6)$$

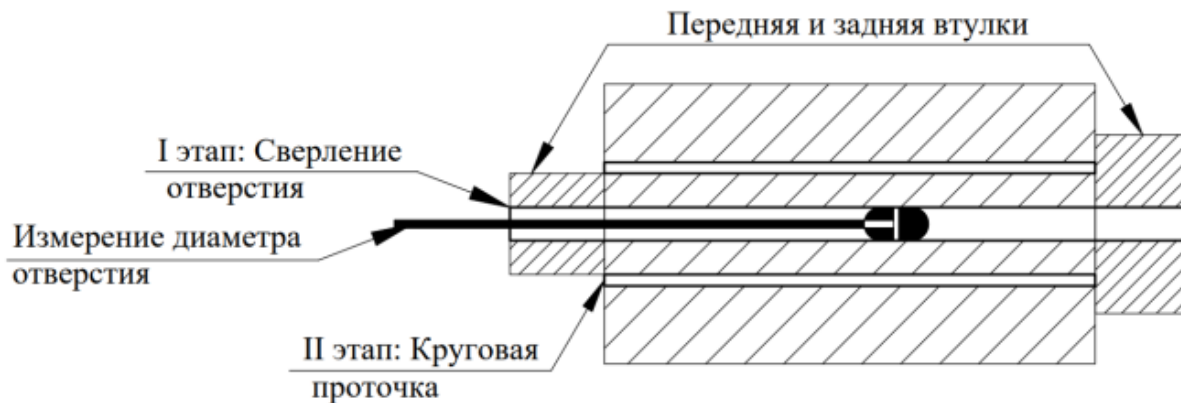


Рис. 6 - Иллюстрация метода сверления «глубоких» отверстий

Этот метод предназначен для определения остаточных напряжений по оси просверленного отверстия на глубинах до 750 мм.

III. Неразрушающие методы определения остаточных напряжений

Неразрушающие методы в основном предоставляют косвенную информацию о состоянии напряжений, выявляя зоны концентрации остаточных напряжений [1]. Однако их точность в количественной оценке остается низкой, что ограничивает практическое применение — они чаще служат для получения качественной картины, не давая точных численных значений.

В целом, существует широкий спектр методов определения остаточных напряжений, отличающихся по характеру воздействия и степени точности, что подтверждается данными [5].

Заключение

По результатам сравнительного обзора существующих методов определения остаточных напряжений приведены основные характеристики используемых технологий оценки готовых изделий с применением разрушающих и неразрушающих методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каргапольцев, С. К. Способы определения термических остаточных напряжений в заготовках типа плит из алюминиевых сплавов / С. К. Каргапольцев, А. К. Мозалевская // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 4(60). – С. 27-32. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-4-27-32. – EDN NAUKUK.
2. Каргапольцев, С. К. Современные технологии диагностики остаточных напряжений / С. К. Каргапольцев, А. К. Мозалевская // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3(63). – С. 15-25. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-3-15-25. – EDN DQXVFO.
3. Патент № 2689901 С2 Российская Федерация, МПК F16F 15/02, F16F 7/10. Устройство управления вибрационным полем технологической машины : № 2017140746 : заявл. 22.11.2017 : опубл. 29.05.2019 / С. В. Елисеев, Р. С. Большаков, А. В. Елисеев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС). – EDN KTQODK.
4. Мозалевская, А. К. К вопросу о применении обобщенного метода определения реакций связей в соединениях элементов механических колебательных систем / А. К. Мозалевская // Проблемы механики современных машин : материалы VII Международной научной конференции, Улан-Удэ, 25–30 июня 2018 года. Том 1. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2018. – С. 51-55. – EDN VOPGZF.
5. Патент № 2131530 С1 Российская Федерация, МПК F02C 7/05, B64D 33/02. Устройство для защиты двигателя летательного аппарата от попадания посторонних предметов : № 98105978/28 : заявл. 30.03.1998 : опубл. 10.06.1999 / С. В. Пахомов, Д. В. Соколов, Р. В. Банцевич ; заявитель Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище. – EDN BJIGST.
6. Патент № 2168645 С2 Российская Федерация, МПК F02C 7/05, B64D 33/02. Бортовая система защиты силовой установки летательного аппарата от засасывания посторонних предметов : № 99100478/28 : заявл. 15.01.1999 : опубл. 10.06.2001 / С. В. Пахомов, О. Г. Устинов, Г. А. Перегуда ; заявитель Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище. – EDN WCPFQR.
7. Пахомов, С. В. Моделирование пространственных вихревых течений воздушного потока на входе в воздухозаборник самолета / С. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 2(38). – С. 91-98. – EDN QCLXSJ.
8. Мозалевская, А. К. Исследование остаточных напряжений. Численное моделирование / А. К. Мозалевская, Р. С. Большаков, С. К. Каргапольцев // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 2(66). – С. 16-21. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-16-21. – EDN KSSPFJ.

REFERENCES

1. Kargapoltsev, S. N. K. N. Methods for determining thermal residual stresses in blanks such as aluminum alloy plates / S. N. K. N. Kargapoltsev, A. N. K. N. Mozalevskaya // Systems. Methods. Technologies. – 2023. – № 4(60). – St. 27-32. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-4-27-32. – EDN NAUKUK.
2. Kargapoltsev, S. N., K. N. Modern technologies for diagnostics of residual stresses / S. N., K.

N. Kargapol'tsev, A. N., K. N. Mozalevskaya // Systems. Methods. Technologies. – 2024. – № 3(63). – St. 15-25. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-3-15-25. – EDN DQXVFO.

3. Patent No. 2689901 C2 Russian Federation, IPC F16F 15/02, f16f 7/10. Vibration field control device of a technological machine: No. 2017140746: application 22.11.2017: published 29.05.2019/S. V. N. Eliseev, R.N. St. Bolshakov, A. N. V. N. Eliseev [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk State University of Railway Transport (FSBEI HE IrGUPS). – EDN KTQODK.

4. Mozalevskaya, A. N. K. N. On the application of a generalized method for determining bond reactions in compounds of elements of mechanical oscillatory systems / A. N. K. N. Mozalevskaya // Problems of mechanics of modern machines : proceedings of the VII International Scientific Conference, Ulan-Ude, June 25-30, 2018. Volume 1. -Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management, 2018. - Pp. 51-55. – EDN VOPGZF.

5. Patent No. 2131530 C1 Russian Federation, IPC F02C 7/05, B64D 33/02. A device for protecting an aircraft engine from foreign objects : No. 98105978/28 : application. 30.03.1998 : published on 06/10/1999 / S. V. Pakhomov, D. V. Sokolov, R. V. Bantsevich ; applicant Irkutsk Higher Military Aviation Engineering School. – EDN BJIGST.

6. Patent No. 2168645 C2 Russian Federation, IPC F02C 7/05, B64D 33/02. On-board aircraft power plant protection system from foreign object suction : No. 99100478/28 : application 15.01.1999 : published 10.06.2001 / S. V. Pakhomov, O. G. Ustinov, G. A. Pereguda ; applicant Irkutsk Higher Military Aviation Engineering School. – EDN WCPFQR.

7. Pakhomov, S. V. Modeling of spatial eddy currents of air flow at the entrance to the air intake of an aircraft / S. V. Pakhomov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2013. – № 2(38). – Pp. 91-98. – EDN QCLXSJ.

8. Mozalevskaya, A. N. K. N. Investigation of residual stresses. Numerical modeling / A. N. K. N. Mozalevskaya, R. N. St. Bolshakov, S. N. K. N. Kargapol'tsev // Systems. Methods. Technologies. – 2025. – № 2(66). – St. 16-21. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-16-21. – EDN KSSPFJ.

Информация об авторах

Мозалевская Анна Константиновна – старший преподаватель кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: mozalevskay@mail.ru

Information about the authors

Mozalevskaya Anna Konstantinovna – Senior lecturer of the Department «Construction of Railways, Bridges and Tunnels», Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, e-mail: mozalevskay@mail.ru