

М. А. Кузьмицкий,
д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Н. М. Ксенофонтов,
инженер-исследователь, аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

И. Н. Базавлук,
конструктор 1-й категории,
ОАО ЦКБ МТ «Рубин»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ОБРАЗОВАНИЯ МАКРОТРЕЩИН

RESEARCH OPPORTUNITIES AND CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF FATIGUE FRACTURE ELEMENTS OF MACHANICAL SYSTEMS AT THE STAGE OF EDUCATION MACROCRACKS

В статье представлены результаты анализа разработанных критериев условий развития трещин и проведенных расчетных исследований зависимости величины напряжений у вершины трещины от ее глубины, выполненные на примере грузового зубчатого колеса механизма, с целью установления предельно допустимых значений дефекта при эксплуатационном контроле.

The article presents the results of the analysis criteria developed conditions for the development of cracks and conducted computational studies of the dependence of the stress at the crack tip on its depth, made an example of cargo gear mechanism, in order to establish the maximum permissible values of the defect at the operational control.

Ключевые слова: механическая система, макротрещина, фактическая усталостная долговечность, вершина трещины, напряженно-деформированное состояние, расчетные исследования, конечно-элементная модель.

Key words: mechanical system, macrofissure, the actual fatigue life, the crack tip stress-strain state, computational studies, finite element model.



УСТАЛОСТНЫЕ повреждения элементов механических систем во многих случаях ограничивают их надежность, что подтверждает актуальность работ в этом направлении. В работе [1, с. 55–63] представлены результаты исследований полей номинальных напряжений при рабочих нагрузках в зубчатых колесах механизмов привода подъемно-опускных ворот, установленных на шлюзах № 1–7 ФБУ «Администрация “Волго-Балт”». В результате проведенных исследований установлены участки с повышенным уровнем номинальных напряжений, на которых наиболее вероятно образование и развитие усталостных трещин во время эксплуатации. Факт наличия усталостных трещин на них подтвержден результатами выполненных натурных обследований.

В соответствии с нормативными документами наличие трещин в ответственных элементах не допускается, так как прогнозирование скорости и направления их развития затруднительно. Однако на практике установлены случаи остановки развития усталостных трещин. В технической литературе [2–6] имеется информация о возможности и условиях нераспространения усталостных трещин. Например, в работах [2; 3] высказано предположение, что нераспространяющиеся усталостные трещины возникают тогда, когда переменное напряжение, необходимое для образования трещины, меньше напряжения, необходимого для ее развития.

Целью настоящих исследований является установление возможности и условий безопасной эксплуатации зубчатых колес привода подъемно-опускных ворот при наличии усталостных трещин на участках элементов с повышенным уровнем номинальных напряжений до их замены.

Для оценки фактической усталостной долговечности элементов, имеющих дефекты типа трещин, принципиально могут использоваться:

- критерии нераспространения усталостных трещин, рассмотренные в работах [2–6];
- наблюдение за дефектом (контроль размерных характеристик) с периодичностью, зависящей от частоты нагружений и вероятности приложения нагрузок, превышающих расчетный уровень;
- сочетание вышеизложенных подходов.

Следует отметить, что оценка остаточного ресурса элементов, обусловленная протеканием процесса усталостного разрушения, при диагностировании эксплуатируемых механических систем возможна при соблюдении следующих условий:

- наличие необходимого и достаточного состава контролируемых (измеряемых) параметров, характеризующих динамику развития процесса;
- техническая возможность измерения вышеуказанных диагностических параметров с достаточной точностью и периодичностью;
- наличие предельных допустимых значений контролируемых параметров (или их сочетаний), после достижения которых возможно недопустимое развитие процесса.

В общем случае нераспространение или торможение усталостной трещины зависит от четырех групп факторов [3]:

- характера напряженного состояния элементов при расчетных нагрузках;
- фактического состава спектра нагружений элемента при эксплуатации;
- свойств материала, из которого они изготовлены;
- воздействий окружающей среды, вызывающей образование эксплуатационных дефектов (коррозионно-язвенное разрушение, прижоги, накопление деформации).

В разработанных критериях остановки развития трещин [2–6] рассматриваются силовые, энергетические и феноменологические модели. В качестве основных показателей, определяющих вероятность остановки или развития трещины, используются следующие основные показатели:

- K_σ — эффективный коэффициент концентрации напряжений;
- K_i — коэффициент интенсивности напряжений;
- G_c — удельный расход энергии при критических условиях нагружения;
- σ_R — сопротивление распространению трещины.

В работе [3] отмечается, что полученные при разработке критериев теоретические зависимости подтверждаются результатами экспериментальных исследований на образцах. Однако использование в полной мере этих критериев для установления возможности безопасной эксплуатации элементов механических систем, имеющих усталостные повреждения, не представляется возможным по следующим причинам:

- рассмотренные показатели нераспространения трещин при диагностировании действующих механических систем будут обладать высокой погрешностью, так как многие параметры, необходимые для их оценки, не могут быть установлены в условиях эксплуатационного контроля;
- в настоящее время отсутствуют отработанные технические средства и методики оценки (измерения, расчета) многих вышеуказанных параметров с необходимой периодичностью;
- все рассмотренные критерии остановки трещин предполагают постоянство амплитуд нагружений, принятое для лабораторных исследований, но маловероятное для эксплуатируемых механических систем.

Отметим, что все критерии остановки роста трещин в качестве одного из параметров, характеризующих вероятность торможения процесса разрушения, рассматривают уровень напряжений у вершины трещины. Значимость этого параметра представляется очевидной, с учетом того, что потенциальное развитие дефекта может быть реализовано только через рассматриваемую локальную зону.

Установлено, что скорость развития трещин зависит от величины номинальных напряжений и глубины дефекта [2; 7]. С целью установления количественной зависимости величины напряжений у вершины трещины от ее глубины (величина которой может быть установлена при эксплуатационном контроле) выполнены расчетные исследования со следующими допущениями:

- материал элемента имеет неизменные характеристики на всей глубине распространения трещины;
- площадь неповрежденного сечения $F_{\text{нп}}$ элемента значительно превышает площадь трещины $F_{\text{т}}$, что позволяет считать уровень номинальных напряжений постоянным ($\sigma_a = \text{const}$) во всем диапазоне проведения исследований.

Исследования проводились на примере повреждений грузового зубчатого колеса, материал которого имеет следующие характеристики:

- материал — сталь 45Л;
- модуль нормальной упругости — $E = 2,1 \times 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона — $\mu = 0,3$;
- предел текучести — $\sigma_{\text{т}} = 353$ МПа.

Для установления степени влияния дефектов в напряженных участках детали выполнен расчет полей номинальных напряжений в зоне дефекта с помощью конечно-элементного пакета ANSYS.

Для расчета использовался метод подмоделирования, который позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние (далее — НДС) локальной области рассматриваемой конструкции. Суть метода сводится к выделению из глобальной модели локального участка с внедренным дефектом, на котором строится сетка, значительно более мелкая, чем в глобальной модели. Нагружение подмодели производится путем приложения к узлам на границе локальной и глобальной моделей перемещений из поля перемещений узлов глобальной модели.

Конечно-элементная модель колеса с внедренным условным дефектом представлена на рис. 1. В зоне дефекта сетка конечно-элементной модели сгущается (рис. 2). Размер элементов в зоне трещины 2 мм, в зоне значительного изменения размера элемента — 5 мм, вне зоны трещины — 25÷50 мм.

Подмодель с внедренным дефектом представлена на рис. 3. Размер элемента в зоне вершины дефекта 0,2 мм, вне этой зоны — 1÷2 мм.

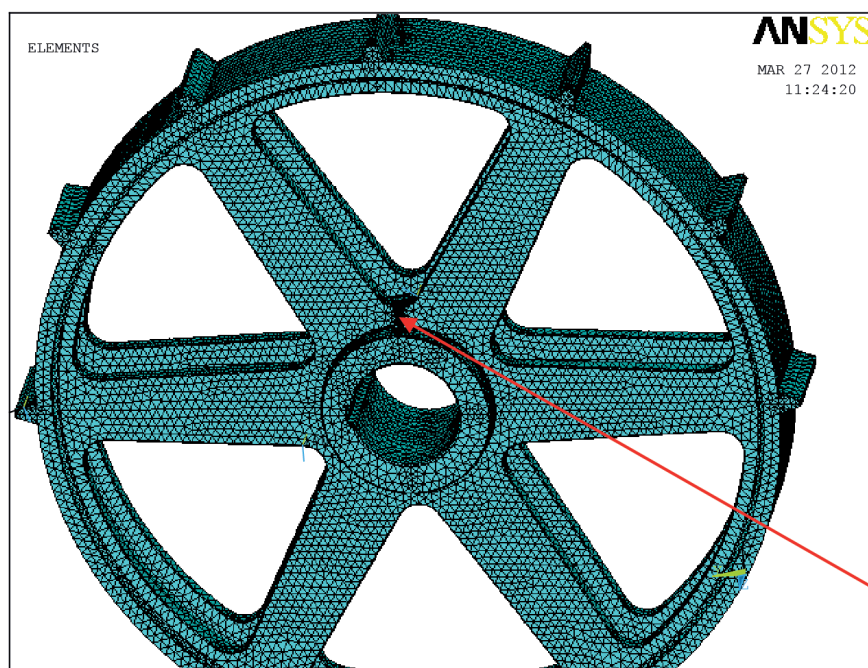


Рис. 1. Конечно-элементная модель с внедренным дефектом

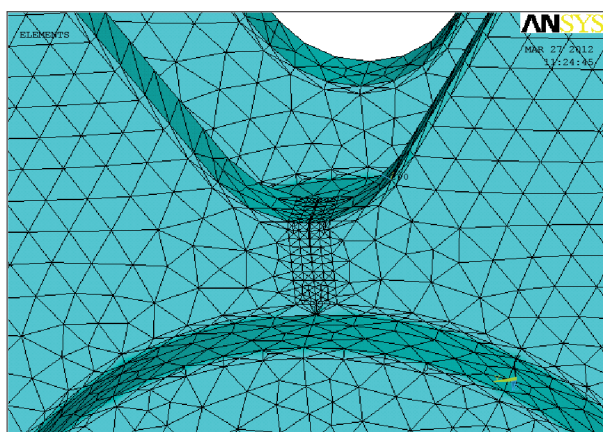


Рис. 2. Конечно-элементная сетка в области дефекта

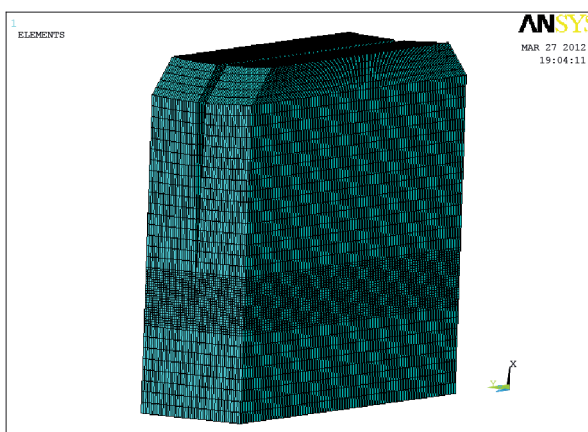


Рис. 3. Подмодель с внедренным дефектом

Для оценки распределения нормальных и эквивалентных напряжений введена норма по пределу текучести материала 353 МПа (3500 кг/см^2), а для касательных напряжений — $0,7 \cdot 353 \text{ МПа} = 245 \text{ МПа}$ (2450 кг/см^2).

SX — радиальные напряжения, SY — окружные напряжения, SEQV — эквивалентные напряжения.

Величины напряжений с отрицательным знаком соответствуют сжимающим напряжениям, растягивающим напряжениям соответствует положительный знак величин напряжений.

Расчет выполнен для дефектов глубиной 2, 10, 12, 14, 16, 18 и 20 мм. Для каждого случая построена глобальная модель, к которой прилагались радиальные и окружные усилия, и подмодель в области дефекта. Полученные глобальные модели и подмодели для рассчитанных дефектов показаны на примере эквивалентных напряжений для трещин глубиной 2 и 20 мм в соответствии с рис. 4–7. Величины напряжений от приложенных усилий показаны цветом, который следует сравнивать с цветовой шкалой внизу рисунка. Общая информация об уровне напряжений в вершине дефекта с заданными глубинами представлена в табл. 1.

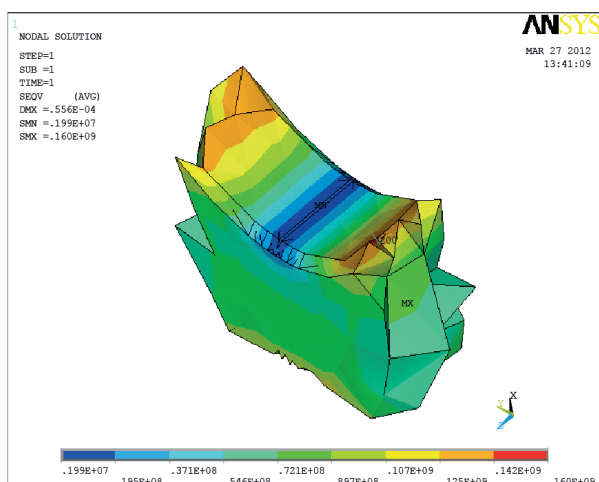


Рис. 4. Глобальная модель поля эквивалентных напряжений в области дефекта глубиной 2 мм

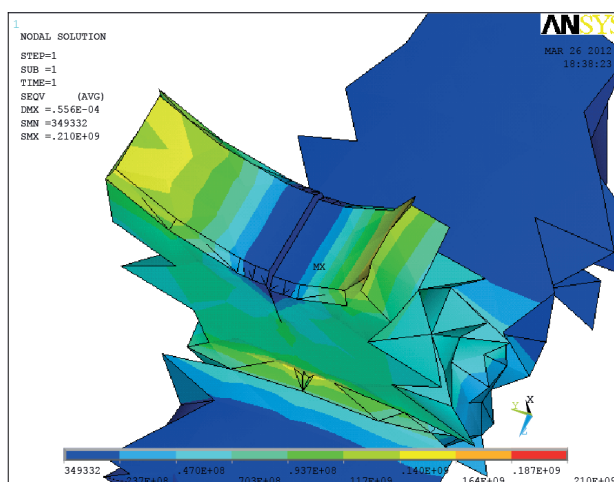


Рис. 5. Глобальная модель поля эквивалентных напряжений в области дефекта глубиной 20 мм

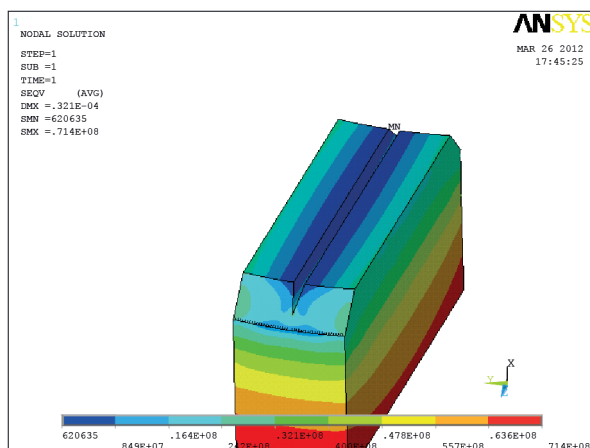


Рис. 6. Подмодель поля эквивалентных напряжений для дефекта глубиной 2 мм

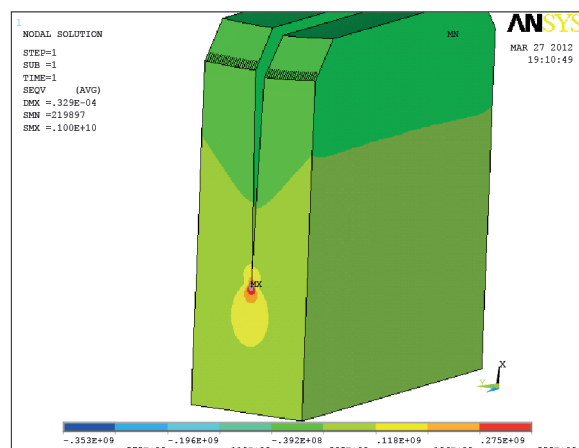


Рис. 7. Подмодель поля эквивалентных напряжений для дефекта глубиной 20 мм

Таблица 1

Значения напряжений от приложенных усилий в вершине дефекта

Вид напряжений, МПа	Глубина внедренного дефекта, мм						
	2	10	12	14	16	18	20
Радиальные	24,8	262	326	400	462	513	564
Окружные	26,6	43,8	54,4	67,9	77,9	87,1	94,7
Эквивалентные	71,4	339	420	514	592	656	720

На рис. 8 представлены графические зависимости напряжений в вершине дефекта от его глубины.

Из результатов выполненных расчетных исследований, представленных в табл. 1 и на рис. 8, следует:

- зависимость напряжений у вершины трещины от ее глубины в исследуемом диапазоне близка к линейной;
- при наличии информации об уровне номинальных напряжений на участке расположения дефекта и его глубине может быть выполнена оценка величины напряжений у вершины трещины;
- для исследуемого материала при $\sigma_a = \text{const}$ напряжения у вершины трещины достигают σ_{-1} при $l = 7$ мм и σ_T при $l \approx 10$ мм.

Приведенные в настоящей работе результаты анализа разработанных критериев условий развития трещин и проведенные расчетные исследования зависимости величины напряжений у вершины трещины от ее глубины позволяют сделать следующие выводы:

- известные критерии условий развития трещин при существующем уровне их разработки не могут быть в полной мере использованы при техническом диагностировании механических систем, так как требуют наличия информации о ряде параметров, оперативное получение которой представляется проблематичной при эксплуатационном контроле;
- рассчитанные методом конечных элементов номинальные напряжения и измеренные значения глубины трещины позволяют оценить уровень напряжений у ее вершины, являющийся необходимым количественным показателем вероятности развития дефекта;
- степень достаточности этого показателя может являться предметом последующих исследований по установлению других информативных показателей, количественная оценка которых может быть реализована при эксплуатационном контроле механических систем;

— до получения результатов таких исследований обеспечение безопасной эксплуатации элементов, имеющих дефекты типа трещин глубиной, не больше допустимой, может быть обеспечено периодическими наблюдениями за их развитием;

— полученные значения глубин трещин, при которых напряжения у их вершины достигают σ_T и σ_{-1} , могут рассматриваться как базовые для установления предельно допустимых их значений с корректировкой на нестабильность цикла нагружений и степени ответственности механической системы;

— расчетные методы исследования НДС элементов имеют широкий диапазон возможностей в областях упругих и упругопластических деформаций, однако не обладают оперативностью, необходимой при проведении диагностических работ, в связи с этим представляется перспективным проведение исследований возможности непосредственного измерения номинальных напряжений с использованием методов неразрушающего контроля, активно развивающихся в настоящее время.

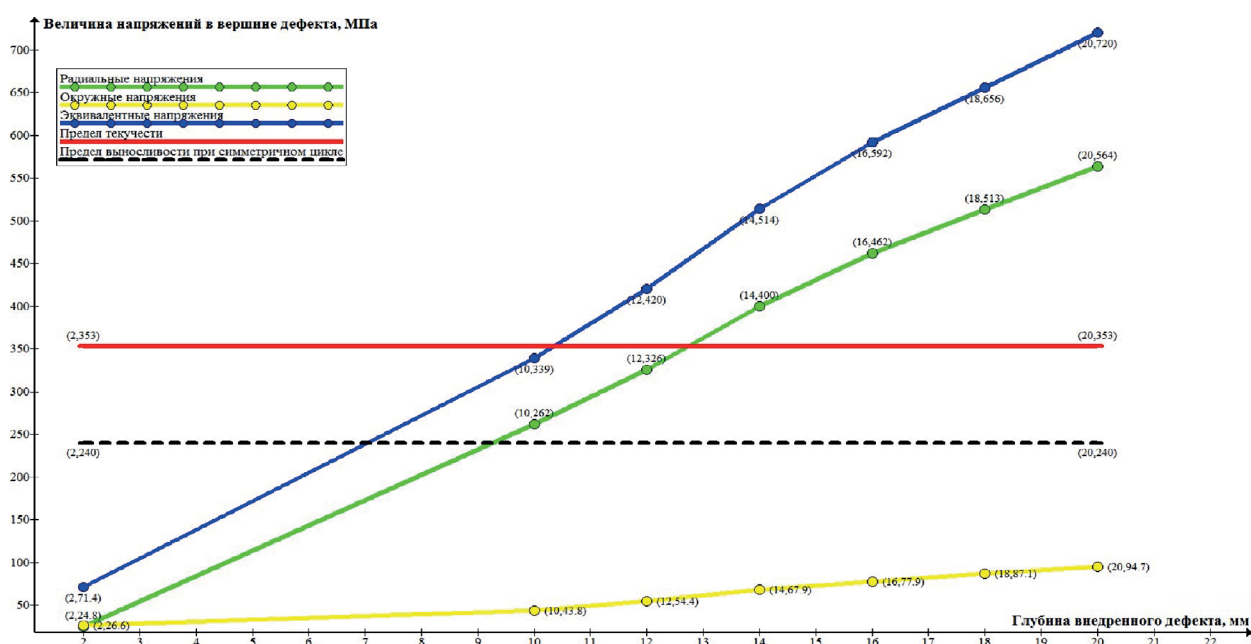


Рис. 8. График зависимости величины напряжений в вершине внедренного дефекта от его глубины

Примечание. Значения предела текучести и предела выносливости при симметричном цикле указаны для нормальных напряжений.

Список литературы

1. Кузьмицкий М. Л. Определение уровня действующих напряжений на колесах открытых зубчатых передач: [Текст] / М. Л. Кузьмицкий, Н. М. Ксенофонов, И. Н. Базавлук // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3 (19).
2. Форрест П. Усталость металлов: пер. с англ.: [Текст] / П. Форрест. — М.: Машиностроение, 1968. — 352 с.
3. Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины: [Текст] / П. И. Кудрявцев. — М.: Машиностроение, 1982. — 171 с.
4. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушений материалов: [Текст] / Л. С. Мороз. — Л.: Машиностроение, 1984. — 223 с.

5. Слепян Л. И. Механика трещин: [Текст] / Л. И. Слепян. — Л.: Судостроение, 1981. — 295 с.
6. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов: [Текст] / В. И. Владимиров. — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
7. Карпенко Г. В. Работоспособность конструкционных материалов в агрессивных средах: [Текст] / Г. В. Карпенко // Карпенко Г. В. Избранные труды: в 2 т. — Киев: Наук. думка, 1985. — Т. 2. — 238 с.

УДК 629.5.081:338.32: 338.984

А. В. Малько,
аспирант,
Институт проблем рынка
и экономико-экологических
исследований НАН Украины

**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ
СУДОРЕМОНТНО-СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
В РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ И г. СЕВАСТОПОЛЕ**

**ANALYSIS OF PROSPECTS OF SHIP REPAIR AND SHIPBUILDING
ENTERPRISES IN THE REPUBLIC OF CRIMEA
AND THE CITY OF SEVASTOPOL**

Производится краткий анализ перспектив развития судоремонтно-судостроительных предприятий Республики Крым и г. Севастополя с учетом новых экономических и политических реалий. При этом используется практический опыт работы автора с ведущими предприятиями отрасли в г. Севастополе.

There was made a brief analysis of the development prospects of the ship repair and shipbuilding enterprises of the Republic of Crimea and Sevastopol city at the new economic and political realities. The author used his hands-on Sevastopol city industry leaders experience to improve the article key ideas.

Ключевые слова: экономика судостроения и судоремонта, судостроение, судоремонт, судоремонтно-судостроительное предприятие.

Key words: economics of shipbuilding and ship repair, shipbuilding, ship repair, ship repair and shipbuilding company.

В СВЯЗИ со вступлением в состав Российской Федерации Республики Крым и города федерального значения Севастополя судоремонтно-судостроительным предприятиям региона приходится проводить новые стратегические и тактические анализы рынков сбыта своей продукции с учетом новых экономических и политических реалий.

Согласно Федеральному конституционному закону РФ № 6-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Республики Крым и образовании в составе Российской Федерации новых субъектов Республики Крым и города федерального значения Севастополя» от 21 марта 2014 г. до 1 января 2015 г. в Крыму и Севастополе действует переходный период, в течение которого урегулируются вопросы интеграции новых субъектов Российской Федерации в экономическую, финансовую, кредитную, правовую, законодательную и исполнительную системы России [1].

В течение этого периода предусматривается безболезненная интеграция региона в состав Российской Федерации.