

Задача о статическом внедрении конического индентора в область с поверхностным упрочнением

А.Н. Бескопильный, А.А. Веремеенко, Ф.С. Копылов, В.С. Крымский

Донской государственной технической университет, Ростов – на – Дону

Аннотация: В статье рассматривается актуальная проблема оценки механических характеристик двухслойных материалов неразрушающими методами (метод вдавливания конического индентора). Произведен расчет процесса вдавливания индентора в двухслойную среду, методом конечных элементов в среде ANSYS. Произведена оценка влияния толщины слоя на параметры вдавливания.

Ключевые слова: конический индентор, неразрушающий контроль, механические характеристики, прочность, испытания металла, метод конечных элементов, твердость, поверхностное упрочнение.

Наиболее значимыми задачами в машиностроении и строительстве являются: увеличение качества зданий, построек, механизмов, транспортных и подъемно-транспортных средств, обеспечение их безопасной эксплуатации и работоспособности в течение всего жизненного цикла. В настоящее время участились несчастные случаи на магистральных водо-, газо- и нефтепроводах, усилилась проблема обеспечения эксплуатационной надежности металлических конструкций на предприятиях энергетической и нефтехимической индустрии. После окончания функционирования многих заводов, фабрик и прочих предприятий, принадлежащие им здания и сооружения, остались без внимания и должного обслуживания некоторое время. В частности, этот вопрос важен в случае реконструкции после критических внешних воздействий. [1-10].

Главными способами определения механических характеристик различных материалов (в том числе и металлов) являются разрушающие методы, тем не менее, в последнее время, получают популярность неразрушающие методы контроля. Одним из таких способов является всеми известный метод вдавливания инденторов (определение твердости). Ряд элементов конструкций может иметь упрочненный слой, например арматура после термо-механического упрочнения. Если говорить об экспресс методах

проведения обследований (измерениях непосредственно на объекте), то огромный практический интерес может представлять оценка влияния толщины упрочненного слоя на параметры вдавливания.

Для оценки сказанного выше была решена задача о статическом внедрении конического индентора с углом при вершине 120° , в область, имеющую упрочненный слой. Для разрешения этой задачи был использован известный метод конечных элементов (МКЭ). Имитация производилась с использованием программного комплекса ANSYS. Была разработана конечно элементная модель в осесимметричной постановке (рис. 1а). Для имитирования полу бесконечного пространства были использованы четырехузловые изопараметрические элементы PLANE42, при этом их число меняли от 150 до 1600. Общее число узлов брали от 240 до 2800. С целью лучшего приведения взаимодействия материала полупространства с индентором, в области контакта, оценки контактных напряжений, перемещений и деформаций потребовалось более частое разбиение конечноэлементной сетки в области контакта. Вертикальное и горизонтальное разбиение в контактной зоне непосредственно под индентором составляло от 0,0125 до 0,08 мм при размерах конечной зоны контакта не более $R=2$ мм. При построении модели индентора использовали также четырехугольные четырехузловые элементы PLANE42. В связи с тем, что в качестве материала индентора обычно пользуют либо алмаз, либо твердый вольфрамокобальтовый сплав (ВК6, ВК8), его свойства при моделировании были заданы только упругими константами.

Поскольку зону взаимодействия индентора с упругопластической областью заранее прогнозировать невозможно, для решения этой задачи в зоне контакта между поверхностью этой области и коническим индентором были использованы контактные элементы типа поверхность-поверхность (TARGE169 и CONTA171), причем одна из контактных поверхностей

(TARGE169) относиться к конической поверхности индентора, как наиболее твердой, а другая (CONTA171) – поверхности в зоне возможного контакта упругопластической области (рис. 1а). Контактный узел, оказавшийся в зоне мишени, может скользить вдоль линии взаимодействия с коэффициентом трения μ и создает две силы в тангенциальном и нормальном направлениях. Такая система применяется для выявления контакта между рассматриваемыми областями и моделирования взаимодействия узловых точек соприкасающихся тел в процессе деформирования.

Распознавание контакта происходит, если зазор между контактными элементами CONTA171 и TARGE169 в процессе деформации оказывается меньше установленного значения. Соответствующее контактное усилие прикладывается непосредственно в узлах элементов. Для моделирования упругопластических свойств основного материала полупространства и упрочненного слоя применяли билинейную модель, с изотропным упрочнением (предел текучести основного металла был принят равным 245 МПа, слоя – 315 МПа).

Нагрузка на индентор при решении задачи была задана смещением его верхних узлов (рис. 1, а). Для улучшения итеративного процесса сходимости решения его продолжали до выполнения условия снижения параметра сходимости до значений 10^{-4} (0,01%). Шаговое вертикальное перемещение конуса избирали из условия выполнения сходимости решения в пределах 5 итераций. Метод конечных элементов при решении контактных упругопластических задач позволяет учитывать по возможности максимальное количество факторов, влияющих на процесс внедрения.

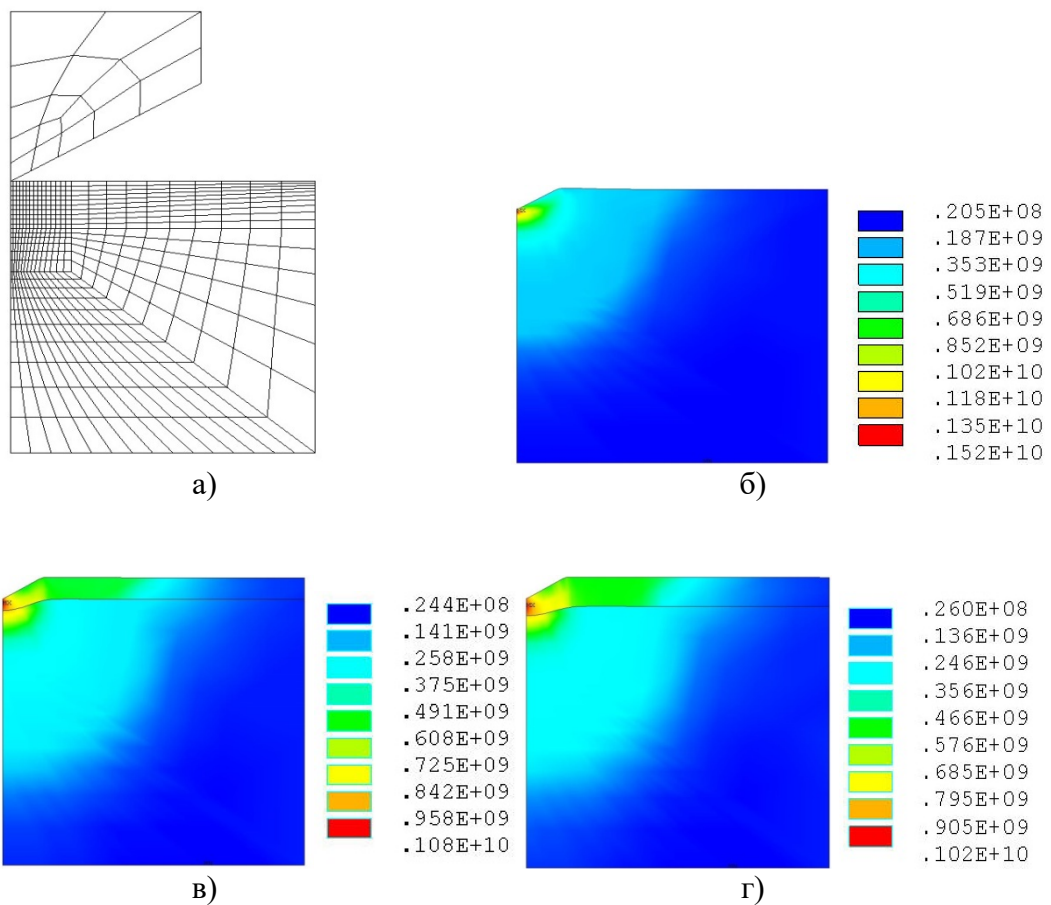


Рис. 1. Конечноэлементная сетка и поля эквивалентных напряжений в упругопластической области

Граничные условия:

- все точки упругопластической области с координатой $y = -h$ зафиксированы в вертикальном направлении ($u_y=0$), где h – высота упругопластической области;
- все точки, лежащие на оси симметрии зафиксированы в радиальном направлении ($u_x=0$);
- давление конуса на полупространство, осуществляется последовательным смещением верхнего торца конуса.

В качестве критерия текучести материала был использован критерий Мизеса: $f = J_2 - k^2 = 0$,

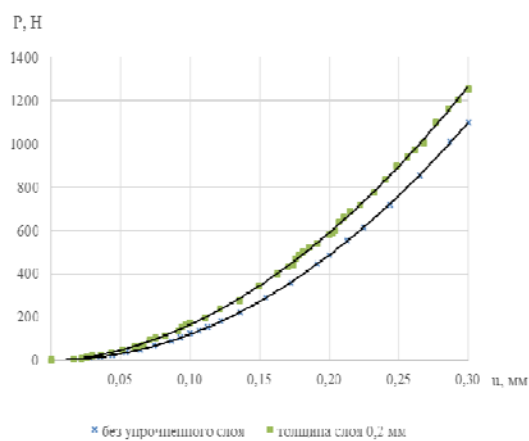
где k - константа материала; J_2 - второй инвариант тензора-девиатора напряжений (1).

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}, S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk}. \quad (1)$$

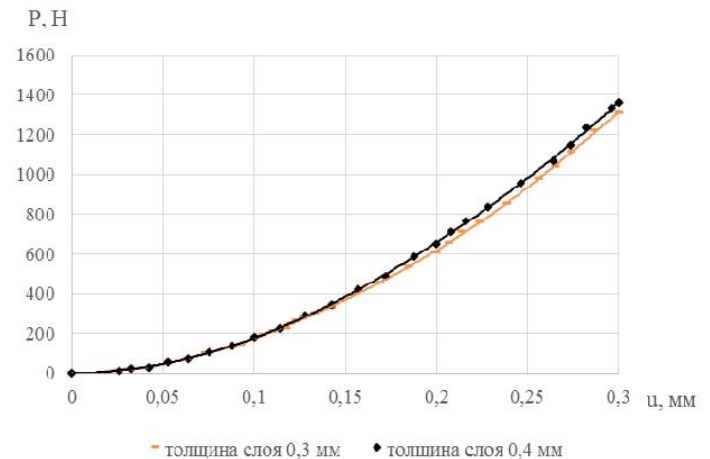
Если ввести эквивалентные напряжения Мизеса $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, то условие текучести может быть представлено в виде:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\sigma]. \quad (3)$$



а)



б)

Рис. 2. Зависимости усилия от углубления для стали 35 и конуса 120°
а) – без упрочненного слоя и с упрочненным слоем толщиной 0,2 мм;
б) – с упрочненным слоем толщиной 0,3 и 0,4 мм.

В результате решения задачи получили распределение полей смещений, деформаций, напряжений. На рис. 1 б, в, г показаны поля эквивалентных напряжений Мизеса (в Паскалях) $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ для материала без упрочненного слоя, с толщиной упрочненного слоя 0,2, 0,3 и 0,4 мм соответственно. На глубине примерно $2a$ по оси симметрии y , где a – радиус отпечатка на рис. 1 б), в), г) видна зона разгрузки. Такое напряженно-

деформированное состояние характеризуется низким уровнем (или полным отсутствием) касательных напряжений и близко к гидростатическому сжатию.

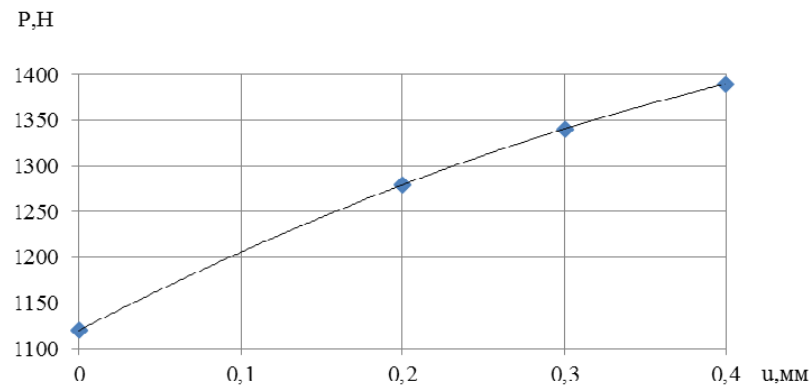


Рис. 3 – Зависимость максимальной силы вдавливания от толщины упрочненного слоя

На рис. 2 представлены зависимости нагрузки на инденторе от глубины его внедрения.

Анализ итогов указывает повышение нагрузки на инденторе при увеличении толщины упрочненного слоя. При этом изменении толщины слоя от 0,2 мм до 0,4 мм вызывает увеличение нагрузки на инденторе. Стоит отметить, что наиболее существенное увеличение наблюдается на рисунке 2 а. При увеличении толщины слоя от 0,2 до 0,4 мм изменение нагрузки менее заметно (рис. 3). Сравнение усилия вдавливания показывает разницу около 23% и больше по результатам численного анализа между неупрочненным материалом и упрочненным на толщину 0,4 мм, это может оказывать существенное влияние на результаты оценки механических характеристик металлов.

Литература

1. Вернези Н.Л., Веремеенко А.А., Явруан А.Х., Вальдман Д.С. Об оценке прочностных возможностей металла трубных шпунтовых



конструкций// Инженерный вестник Дона, 2017, №1 URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4011.

2. Роговенко Т.Н., Зайцева М.М. Оценка оптимального значения вероятности безотказной работы деталей машин, на примере рукоятки одноковшового экскаватора // Инженерный вестник Дона, 2016, №4 URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3848.

3. Кадомцева Е.Э., Бескопыльный А.Н. Расчет на прочность армированных балок с заполнителем из бимодульного материала с использованием различных теорий прочности // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2125.

4. Вернези Н.Л., Веремеенко А.А., Исследование прочностных характеристик металлического крепежа деревянного корпуса речного причала // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231.

5. Beskopylny A., Veremeenko A., Yazyev V. Metal structures diagnosis by truncated cone indentation // В сборнике: Matic Web of Conferences Editor V. Mergul. 2017. p. 04004. p. 9

6. Litvinov S., Beskopylny A., Trush L., Yazyev S. Optimization of thick-walled spherical shells at thermal and power influences// В сборнике: Matic Web of Conferences Editor V. Murgul. 2017. p. 04013. p. 5

7. Бескопыльный А.Н., Кадомцева Е.Э., Моргун Л.В. Изгиб армированной балки переменного поперечного сечения с бимодульным заполнителем// Научное обозрение. 2014. № 11-3. С. 805-807.

8. Роговенко Т.Н. Вероятностно-статистическая оценка гамма-процентного ресурса ответственных деталей машин // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: Ростов-на-Дону, 1995. 24с.



9. Зайцева М.М., Мегера Г.И., Касьянов Д.Н. Проблема долговечности деталей грузовых автомобилей // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4076.

10. Зайцева М.М., Мегера Г.И., Веремеенко А.А. Диагностика технического состояния транспортных средств // В книге: Строительство и архитектура – 2015 материалы международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», Союз строителей южного федерального округа, ассоциация строителей Дона. 2015. С. 124-126.

References

1. Vernezi N.L., Veremeenko A.A., Javruan A.H., Val'dman D.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4011.

2. Rogovenko T.N., Zajceva M.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3848.

3. Kadomceva E.Je., Beskopyl'nyj A.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2125.

4. Vernezi N.L., Veremeenko A.A., Val'dman D.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231.

5. Beskopylny A., Veremeenko A., Yazyev B. V sbornike: Matec Web of Conferences Editor V. Mergul. 2017. p. 04004. p. 9

6. Litvinov S., Beskopylny A., Trush L., Yazyev S. V sbornike: Matec Web of Conferences Editor V. Murgul. 2017. p. 04013.p. 5

7. Beskopyl'nyj A.N., Kadomceva E.Je., Morgun L.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 11-3. pp. 805-807.

8. Rogovenko T.N. Veroyatnostno-statisticheskaja ocenka gamma-procentnogo resursa otvetstvennyh detalej mashin [Probabilistic-statistical estimation of



gamma-percentage resource of responsible machine parts] Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk: Rostov-na-Donu, 1995. 24p.

9. Zajceva M.M., Megera G.I., Kas'janov D.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4076.

10. Zajceva M.M., Megera G.I., Veremeenko A.A. V knige: Stroitel'stvo i arhitektura. 2015 materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. FGBOU VPO «Rostovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet», Sojuz stroitelej juzhnogo federal'nogo okruga, asociacija stroitelej Dona. 2015. pp. 124-126.