

УДК 620.178.3:620.194.8

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Пачурин Г.В.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: PachurinGV@mail.ru, <http://www.famous-scientists.ru/1238>

Надежность металлоизделий наряду с конструктивными факторами в значительной мере определяется структурой и свойствами используемых материалов, зависящих от их технологической обработки и температурных условий эксплуатации (южные, средние и северные широты). В процессе изготовления деталей большинство металлов и сплавов подвергаются различным видам и режимам технологической обработки, среди которых наиболее распространенным является пластическое деформирование. В автомобильной и других отраслях промышленности широко используются штампуемые листовые конструктивные малоуглеродистые стали. Однако сведения по влиянию видов и режимов их технологической обработки на механические свойства при различных температурах ограничены и разрознены. В работе приводятся результаты исследования влияния степени объемной пластической деформации на механические свойства листовых конструкционных сталей и их сварных соединений при разных температурах. Установлено, что с увеличением степени предварительной деформации величины условного предела текучести и предела прочности материалов возрастают, а относительных сужения и удлинения – уменьшаются. Получены конкретные экспериментальные данные прочностных и механических свойств при разных эксплуатационных температурах некоторых широко применяемых в автомобильной и машиностроительной промышленности деформированных с разной степенью листовых сталей, позволяющие повысить точность оценки эксплуатационной надежности металлоизделий при снижении в ряде случаев их металлоемкости.

Ключевые слова: листовые автомобильные стали, температура эксплуатации, упрочнение, степень деформации, микроструктура, повреждение, фрактография, прочность, пластичность

EFFECT OF TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEEL SHEET

Pachurin G.V.

FGBOU VPO «Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod,
e-mail: PachurinGV@mail.ru, <http://www.famous-scientists.ru/1238>

Reliability of metal along with structural factors largely determined by the structure and properties of materials, depending on their processing and temperature conditions (southern, middle and northern latitudes). In the process of manufacturing parts, most metals and alloys subjected to various types and modes of processing, among which the most common is plastic deformation. In the automotive and other industries widely used sheet metal formability design low-carbon steel. However, information on the influence of species and their modes of processing on the mechanical properties at different temperatures is limited and piecemeal. The paper presents results of investigation of the degree of bulk plastic deformation on the mechanical properties of the sheet of structural steels and their welded joints at different temperatures. Found that with increasing degree of pre-strain values yield strength and tensile strength of materials is increasing, and the relative contraction and elongation – reduced. Experimental data obtained specific strength and mechanical properties at different operating temperatures of some widely used in the automotive and engineering industries with varying degrees of deformed sheet steels that improve the estimation accuracy of operational reliability while reducing metal, in some cases, their metal content.

Keywords: automotive sheet steel, operating temperature, hardening, the degree of deformation, microstructure, damage, fractography, strength, ductility

Надежность металлоизделий наряду с конструктивными факторами в значительной мере определяется структурой и свойствами используемых материалов, зависящих от вида и режима их технологической обработки, а также температурными условиями эксплуатации (южные, средние и северные широты).

В автомобильной и машиностроительной промышленности широко используются штампуемые листовые конструктивные малоуглеродистые стали. Однако сведения по влиянию видов и режимов их технологической обработки на механические свойства при различных температурах ограничены и разрознены [3, 8, 9].

Поэтому исследование влияния технологического пластического деформирования на изменение механических характеристик листовых сталей в области различных эксплуатационных температур является весьма актуальным.

Методика проведения исследований

С целью выполнения поставленной задачи в работе выбраны стали 08Ю, 08кп, 08пс, 08ГСЮТ, 07ГСЮФТ и сварные соединения из сталей 08 пс, 08 кп, 20 кп, 07ГСЮФ, 08ГСЮФ. Предварительная деформация осуществлялась при комнатной температуре растяжением образцов на универсальной разрывной машине УМЭ-10ТМ со скоростью деформации $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (табл. 1). При этом осадке подвергался не весь образец, а только его участок в опасном сечении.

Испытания на статическое растяжение образцов проводились на разрывной машине ZD 10/90 со скоростью деформации $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. При этом записывалась диаграмма растяжения, начальные и конечные размеры образцов, определялись прочностные ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$) и пластические (δ , ψ) характеристики материалов в состоянии поставки и после технологической обработки. На каждую экспериментальную точку одновременно обрабатывалось по 4 образца.

Низкая температура (-50°C) испытания обеспечивалась криостатом, который представляет собой открытый сосуд диаметром 70 мм и высотой 190 мм. В этот сосуд заливался ацетон, охлажденный до -50°C путем добавления углекислой кислоты. Образец подвергался растяжению, находясь в жидкой среде. Температура измерялась при помощи ртутного термометра.

Повышенная температура ($+70^\circ\text{C}$) достигались в разъемной электропечи с открытой спиралью. Регулировка температуры осуществлялась трансформатором типа РН0-250-10 с использованием термопары типа ХА и прибора для измерения температуры (МР-64-02, класс точности 1,5; ГОСТ 9736-68). Образец испытывался, находясь в печи, то есть в изотермических условиях.

По результатам статических испытаний строились кривые упрочнения в координатах $\lg \sigma_i$ (σ_i – истинное напряжение) – $\lg \varepsilon_i$ (ε_i – истинная деформация), которые позволяют определить показатель степени А в уравнении кривой деформационного упрочнения [7] исследованных материалов в состоянии поставки и после технологической обработки

$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot \varepsilon_i^A,$$

где σ_i – истинное напряжение течения при истинной деформации $\varepsilon_i = \lg(1 + \delta_i)$, МПа;

σ_0 – постоянная, равная истинному напряжению течения при $\varepsilon_i = 1$, МПа.

Изучение микроструктуры материалов образцов и фрактографический анализ их изломов проводились с помощью оптической компоратора «МИР-12», оптического «AKASHI» и электронного «Джеол Т-20» микроскопов.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты испытания при комнатной температуре предварительно пластически деформированных с разной степенью плоских образцов из листовых материалов.

Таблица 1

Механические свойства листовых материалов для различных режимов технологической обработки

Марка стали	Режим технологической обработки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Ψ , %	δ , %	А
08кп	Холоднокатаная	390	256	84	41	0,16
	Растяжение 2,5 %	375	190	83	40,7	0,20
	Растяжение 11 %	377	174	81	40,6	0,22
	Растяжение 15 %	394	192	78	29	0,24
	Растяжение 17 %	400	182	79	21	0,22
	Растяжение 21 %	407	190	77	10	0,20
07ГСЮФТ	Горячекатаная	440	306	48	18	0,16
	Растяжение 5 %	471	433	44	14	0,12
	Растяжение 17 %	545	532	33	3	0,11
	Растяжение 29 %	547	532	30	1,6	0,02
08ГСЮТ	Горячекатаная	461	250	48	26	0,21
	Растяжение 5 %	457	398	46	15	0,16
	Растяжение 17 %	499	466	41	9	0,07
	Растяжение 29 %	551	537	33	1	0,02
08Ю	Холоднокатаная	294	163	50	30	0,25
	Растяжение 3 %	313	230	49	26	0,16
	Растяжение 10 %	315	271	48	17	0,10
	Растяжение 20 %	345	286	35	7	0,07
	Растяжение 30 %	397	343	29	3	0,09
08пс	Холоднокатаная	370	285	70	20	0,18
	Растяжение 4 %	390	340	69	14	0,06
	Растяжение 8 %	415	400	63	4	0,02
	Растяжение 17 %	455	445	63	4	0,02
20кп	Горячекатаная	437	319	48	23	0,18
	Растяжение 9 %	534	530	49	5	0,02
	Растяжение 22 %	602	599	48	4	0,02

Выявлено, что с ростом степени предварительной деформации ($\varepsilon_{\text{пр.д}}$) материалов

их условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ возрастают, а показатели

пластичности (относительные удлинение δ и сужение ψ) снижаются. Ранее было показано [1], что эта зависимость проявляется тем значительней, чем ниже энергия дефектов упаковки (э.д.у.) материала. При этом кривые упрочнения для каждого материала располагаются тем выше, чем больше степень их предварительной деформации [2, 4]. Зависимость «истинное напряжение – истинная деформация» предварительно деформированных металлических материалов иногда оказывается немонотонной, то есть кривые имеют перегиб. В этом случае показатели A_1 и A_2 характеризуют наклон кривой упрочнения соответственно до и после перегиба $A_1 < A_2$. Величина параметров A_1 и A_2 уменьшается с ростом степени предварительного растяжения. Из сопоставления кривых упрочнения для различных сплавов при равных относительных степенях предварительной деформации ($\epsilon_{пр.д}/\epsilon_i$, где ϵ_i – истинная деформация до разрушения при статическом растяжении) следует, что их наклон возрастает с понижением энергии дефекта упаковки материала, где э.д.у. (Дж/м²). Эта зависимость особенно выражена в области малых степеней предварительной деформации.

Микроструктура стали 20кп на уровне зеренного представления (увеличение $\times 300$) практически одинаковая как у исходных, так и у деформированных образцов. При этом увеличение степени предварительного

наклёпа от 0 до 17% обуславливает повышение прочностных характеристик σ_r , $\sigma_{0,2}$ и σ_b и понижение характеристик пластичности δ , ψ и δ_p .

Исходная микроструктура сталей 08кп, 08ГСЮТ и 08ГСЮФТ состоит преимущественно из зёрен феррита и небольшого количества перлита для 08кп, а также карбидных включений для 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ [4]. Размер зерна феррита сталей 08кп и 08ГСЮТ равен 10...30 мкм, а для стали 07ГСЮФТ – 20...40 мкм.

Микрофрактограммы поверхностей разрыва при растяжении листовых образцов из сталей 07ГСЮФТ, 08кп и 08ГСЮТ свидетельствуют о вязком характере разрушения [5]. В изломе сталей 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ чётко видны карбидные частицы (размером ≈ 4 мкм), расположенные преимущественно в ямках поверхности разрыва.

Результаты испытания на статическое растяжение плоских образцов со сварным швом показали, что околошовная зона (зона термического влияния) образцов после различных режимов предварительной пластической обработки деформируется одинаково с обеих сторон шва с образованием подобных шеек, а кривые упрочнения для обеих околошовных зон совпадают.

Результаты на статическое растяжение при разных температурах цельных и сварных образцов исследованных стальных материалов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Механические свойства листовой стали 08пс при разных температурах для различных режимов технологической обработки

Температура испытания, °С	Степень предварительной деформации, %	σ_r , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	δ_p , %	A_1/A_2
20	0	265	285	370	29	70	20	0,02/0,18
	4	320	340	390	19	69	14	0,06
	8	385	400	415	11	63	4	0,02
	17	405	445	455	6	61	0,7	0,02
70	0	240	260	345	27	71	17	0,03/0,17
	4	300	320	355	18	70	14	0,05
	8	375	400	410	7	59	1,5	0,02
	17	405	450	460	6	58	0,8	0,02
–50	0	345	400	470	25	65	20	0,01/0,17
	4	330	395	475	22	58	15	0,05
	9	480	505	520	9	52	3	0,01
	18	500	565	579	9	50	0,3	0,01

Из анализа кривых деформационного упрочнения сваренных листовых образцов из сталей 20кп, 08кп, 08ГСЮТ 07ГСЮФТ [6] следует, что критическая степень деформации, соответствующая перелому кривых, составляет $\sim 2-5\%$. По окончании этой стадии начинается интенсивное упрочнение

с высоким значением величины показателя A . Исходя из представления, что в общем случае кривые деформационного упрочнения имеют сигмообразный (\surd) вид с тремя стадиями упрочнения, можно кривые упрочнения предварительно деформированных образцов отнести к третьей стадии

затухающего, предшествующего разрушению, упрочнения с низким показателем A_1 .

С ростом температуры испытания от -50 до $+70^\circ\text{C}$ стали 08пс параметры прочности σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_B уменьшаются, а пластичности ψ – увеличиваются. При этом возрастание степени предварительной деформации $\epsilon_{\text{пр.д}}$ до 17...18% обуславливает повышение прочностных и понижение пластических харак-

теристик во всем вышеуказанном диапазоне температур статического нагружения.

Величина показателя A_2 у кривых деформационного упрочнения образцов из стали 08пс при температурах $+70$ и -50°C несколько ниже, чем при комнатной температуре. Однако для всех температур с ростом степени предварительной деформации $\epsilon_{\text{пр.д}}$ A_2 существенно уменьшается, особенно при -50°C .

Таблица 3

Механические свойства сварных стальных листовых образцов при разных температурах

Марка стали	Температура, $^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	d_k , %	Y , %	d_p , %	A_1/A_2
08кп	20	170	380	19	79	16	0,23
	70	205	355	24	77	18	0,06/0,21
	-50	315	420	25	76	22	0,06/0,22
08ГСЮФ	20	215	485	16	75	14	0,22
	70	285	450	19	70	16	0,06/0,22
	-50	435	525	22	78	18	0,04/0,22
07ГСЮФ	20	220	345	13	74	10	0,11/0,19
	70	235	345	20	79	15	0,06/0,19
	-50	310	440	21	77	15	0,10/0,16
08пс	20	285	370	29	70	20	0,02/0,18
	70	260	345	27	71	17	0,03/0,17
	-50	400	470	25	65	20	0,01/0,17
20кп	20	290	417	18	52	11,5	0,04/0,16
	70	266	410	17	51	14	0,12/0,16
	-50	580	601	5	55	2,5	0,03

Деформационное поведение сварных образцов из сталей 08кп и 08ГСЮФ характеризуется примерно одинаковым (0,23 и 0,22 соответственно) показателем A_2 , у стали 07ГСЮФТ он ниже (0,16...0,19). При этом если у первых двух сталей перелома на кривых упрочнения практически нет, то у стали 07ГСЮФТ он явно выражен, и первая стадия деформации у неё имеет довольно значительную протяженность ($\sim 5\%$).

При исследованных температурах испытания -50 , 20 , и 70°C у предварительно растянутых образцов из стали 20кп пределы текучести $\sigma_{0,2}$ и σ_T и прочности σ_B выше, а относительные удлинение δ_k (до разрушения) и δ_p (равномерное) ниже, чем у образцов в исходном состоянии, хотя относительное сужение ψ_k и предел прочности до разрушения σ_k практически остаются постоянными.

Охлаждение до -50°C увеличивает прочностные характеристики при сохранении пластичности стали 20кп (на уровне 20°C), что свидетельствует об отсутствии ее охрупчивания при этих температурах.

Анализ кривых деформационного упрочнения стали 20кп и ее сварных соединений при вышеуказанных температу-

рах показал, что при растяжении цельных и сварных образцов, предварительно деформированных до одной и той же степени (17...18%), относительное удлинение (равномерное δ_p и общее δ_k) при -50°C значительно выше, чем при 70°C . Это может быть обусловлено различием атомных механизмов, контролирующих пластическую деформацию. Так, при -50°C усиливается влияние поперечного скольжения винтовых дислокаций по сравнению с движением краевых дислокаций, что обеспечивает некоторое повышение пластичности стали 20кп.

При растяжении исходных (предварительно не деформированных) образцов ($\epsilon_{\text{пр.д}} = 0\%$) в начале наблюдается стадия инкубационного деформирования ($\epsilon \cong 1...2\%$) с низким значением показателя A_1 , а затем начинается интенсивное упрочнение с высоким значением A_2 . С понижением температуры испытания продолжительность стадии инкубационного упрочнения увеличивается, что отражается на величине общего и равномерного удлинения.

Величина показателя упрочнения A наклепанных образцов из стали 20кп при всех исследованных температурах практически одинакова $A = 0,02$, в то время как при

растяжении исходных цельных и сварных образцов для температур 70 и -50°C показатель A несколько ниже, чем при 20°C .

Микроструктура стали 20 кп, деформированной при 20, 70 и -50°C , практически не изменяется.

У сварных образцов из стали 08ГСЮТ наблюдаются более высокие прочностные свойства σ_b и $\sigma_{0,2}$, по сравнению со сталями 08кп и 07ГСЮФТ, у которых они практически одинаковые. Более высокая пластичность у стали 08кп, у сталей 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ параметры δ и δ_r примерно одинаковы, а ψ различается незначительно [10].

Из анализа кривых деформационного упрочнения при 20, 70 и -50°C сваренных встык образцов из сталей 08кп, 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ следует, что критическая степень деформации, соответствующая перелому кривых, составляет $\sim 2...5\%$. У сталей 08кп и 08ГСЮТ показатель A_2 выше (0,23 и 0,22 соответственно), чем у стали 07ГСЮФТ (0,16...0,19).

Исходная микроструктура листовых сталей 08кп, 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ состоит преимущественно из зерен феррита и небольшого количества перлита для 08кп, а также с карбидными включениями у стали 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ. Размер зерна феррита стали 07ГСЮФТ равен 20...40 мкм, а сталей 08кп и 08ГСЮТ – 10...30 мкм.

Структура листовой стали 08пс преимущественно состоит из зерен α -твердого раствора, которые в результате пластической деформации получают определенную вытянутость, что отражается на повышении в связи с этим прочностных характеристик и снижении показателя упрочнения.

Как и в случае ферритной, в ферритно-перлитных сталях 08кп, 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ с величиной зерна 10...40 мкм происходит внутризеренное, относящееся к разным системам, неоднородное скольжение, отличительной особенностью которого является наличие следов механизмов пересечения и поперечного скольжения. С увеличением степени деформации скольжение становится множественным, а плотность следов скольжения возрастает. Момент появления микротрещин и последующее разрушение обуславливаются сдвиговыми актами внутри зерен феррита в условиях сильно развитого множественного скольжения. Стали 07ГСЮФТ и 08ГСЮТ имеют карбидные включения, которые препятствуют движению дислокаций при пластическом деформировании и с ростом степени деформации повышают прочностные характеристики. Однако они являются также источниками образования микротрещин при растяжении.

Фотографии поверхностей разрыва при растяжении образцов из сталей 07ГСЮФТ, 08кп и 08ГСЮТ, испытанных при 20, 70 и -50°C , свидетельствуют о вязком характере разрушения. Марка стали и температура испытания практически не изменяют морфологию поверхности разрыва образцов. При этом в изломе сталей 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ четко наблюдаются карбидные частицы размером около 4 мкм, расположенные преимущественно в ямках поверхности разрыва.

Выводы

1. Установлено, что влияние степени предварительной деформации исследованных материалов на их механические характеристики зависит от температуры испытания.

2. С увеличением степени предварительной деформации величины условного предела текучести и предела прочности материалов возрастают, а относительных сужения и удлинения – уменьшаются. При этом кривые упрочнения располагаются выше и становятся положе.

3. С понижением температуры испытания сталей величина показателей прочности (σ_b и $\sigma_{0,2}$), как правило, возрастает, а показателей пластичности (δ и ψ) – уменьшается. Эта закономерность усиливается по мере увеличения степени предварительного пластического деформирования образцов.

4. Более высокие значения параметров пластичности ферритной стали 08кп характеризуют ее лучшую штампуемость по сравнению с низколегированными сталями 08ГСЮТ и 07ГСЮФТ, что имеет место на практике.

5. Получены конкретные экспериментальные данные прочностных и механических свойств при разных эксплуатационных температурах некоторых широко применяемых в автомобильной и машиностроительной промышленности деформированных с разной степенью листовых сталей, позволяющие повысить точность оценки эксплуатационной надежности металлоизделий при снижении в ряде случаев их металлоемкости.

Список литературы

1. Власов В.А., Пачурин Г.В., Гуслякова Г.П. Коррозионная усталостная прочность пластически обработанных материалов // Автомобильная промышленность. – 1996/ – № 8. – С. 24–25.
2. Пачурин Г.В. Долговечность листовых штампованных материалов на воздухе и в коррозионной среде // Материаловедение. – 2003. – № 7. – С. 29–32.
3. Пачурин Г.В. Долговечность штампованных конструкционных материалов на воздухе и в коррозионной среде // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – № 10. – С. 21–27.

4. Пачурин Г.В. Повышение долговечности листовых штампованных деталей из высокопрочных сталей и сплавов // КШП. ОМД. – 2003. – № 11. – С. 7–11.

5. Пачурин Г.В. Долговечность на воздухе и в коррозионной среде деформированных сталей // Технология металлов. – 2004. – № 12. – С. 29–35.

6. Пачурин Г.В. Повышение коррозионной долговечности и эксплуатационной надежности изделий из деформационно-упрочненных металлических материалов. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 132 с.

7. Пачурин Г.В. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в различных условиях нагружения: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гушчин, К.Г. Пачурин и др. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 139 с.

8. Пачурин Г.В. Микромеханизмы высокотемпературной усталости и ползучести металлов и сплавов: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, С.М. Шевченко, В.Н. Дубинский и др. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 116 с.

9. Пачурин Г.В. Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // Вестник машиностроения. – 2012. – № 7. – С. 65–68.

10. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. – 2008. – № 3. – Т. 38. – Р. 217–220.

References

1. Vlasov V.A., Pachurin G.V., Guslyakova G.P. Corrosion fatigue strength plastic materials processed // Automotive industry. 1996, no. 8. pp. 24–25.

2. Pachurin G.V. Durability of stamped sheet materials in air and in a corrosive environment // Materials. 2003. no. 7. pp. 29–32.

3. Pachurin G.V. Durability forged constructional materials in air and in a corrosive environment // Provision of industrial manufacture. 2003. no. 10. pp. 21–27.

4. Pachurin G.V. Increased durability of sheet stampings of high-strength steels and alloys // CSE. OMD. 2003. no. 11. pp. 7–11.

5. Pachurin G.V. Durability in air and in a corrosive environment deformed steels // Metal Technology. 2004. no. 12. pp. 29–35.

6. Pachurin G.V. Increase the corrosion durability and operational reliability of products from strain-hardened metal materials. – N. Novgorod State Technical University, 2005. 132 p.

7. Pachurin G.V. Technology integrated study destruction of deformed metals and alloys under different loading conditions: studies. Benefit / G.V. Pachurin, A.N. Goushchin, K.G. Pachurin etc. N. Novgorod State Technical University, 2005. 139 p.

8. Pachurin G.V. Micromechanisms high fatigue and creep of metals and alloys: studies. Benefit / GV Pachurin, SM Shevchenko, VN Dubinsky and others – N. Novgorod State Technical University, 2006. 116 p.

9. Pachurin G.V. Durability plastically deformed stainless steels // Bulletin of mechanical engineering. 2012. no. 7. pp. 65–68.

10. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. 2008. no. 3. Т. 38. pp. 217–220.

Рецензенты:

Лоскутов А.Б., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроснабжение и электроэнергетика» (ЭСиЭ), Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород;

Кузьмин Н.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автомобильный транспорт», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород.

Работа поступила в редакцию 27.01.2014.