

УДК 621.7.011

Петров П. А.

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ «ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ» КРИВОЙ ТЕКУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК 4–1

В последние 10–15 лет при разработке новых технологий штамповки, в частности объемной, все большее применение находят методы математического моделирования, например основанного на методе конечных элементов (МКЭ). Этот метод был положен в основу таких систем предназначенных для моделирования технологических процессов объемной штамповки, как QFORM (Россия), DEFORM (США), FORGE (Франция). При подготовке данных для моделирования в любой из перечисленных систем необходимо задать данные о сопротивлении деформации материала заготовки, характеристики технологической смазки и характеристики кузнечно-прессового оборудования, применяемого для изучаемого процесса штамповки.

Точность выполнения расчетов при численном моделировании определяется достоверностью задаваемых исходных данных и, в частности, данных о сопротивлении исследуемого материала пластической деформации и данных о контактном трении между заготовкой и инструментом.

Сопротивление деформации (напряжение текучести) металла либо сплава может быть экспериментально изучено с помощью одного из известных методов проведения простейших механических испытаний (на сжатие, растяжение, кручение). С целью получения полной картины, иллюстрирующей поведение деформируемого материала при повышенных температурах обработки, испытания проводятся при нескольких значениях температуры и нескольких значениях скорости деформации, причем скорость деформации в процессе нагружения поддерживается постоянной. В результате проведения испытаний в соответствии с одним из вышеуказанных методов могут быть получены экспериментальные кривые текучести.

Экспериментальные кривые текучести отражают не только влияние упрочнения-разупрочнения деформируемого материала на величину напряжения текучести, но также и влияние контактного трения и теплового эффекта пластической деформации на сопротивление деформации. Поэтому для решения краевой задачи обработки металлов давлением необходимо скорректировать полученные экспериментальные кривые текучести на величину изменения сопротивления деформации вследствие влияния контактного трения и вследствие влияния теплового эффекта пластической деформации. В противном случае в процессе решения краевой задачи эти эффекты будут учтены дважды. Первый раз учет этих эффектов – контактного трения и теплового эффекта – будет выполнен при задании экспериментальных кривых текучести; второй раз – в ходе решения тепловой и контактной задач [1, 2].

Целью данной статьи является построение «изотермической» кривой текучести [2] алюминиевого сплава АК4–1 при различных температурно-скоростных условиях его деформирования. «Изотермическая» кривая текучести представляет собой зависимость напряжения текучести от величины накопленной деформации и отражает изменение напряжения текучести только вследствие действия в деформируемом материале процессов, связанных с его упрочнением-разупрочнением. При этом кривые текучести скорректированы на величину изменения напряжения текучести из-за теплового эффекта пластической деформации и на величину изменения напряжения текучести, обусловленного влиянием контактного трения.

Сплав АК4–1 относится к жаропрочным деформируемым сплавам на основе системы Al–Cu–Mg–Ni–Fe. Сплавы этой системы хорошо деформируются в горячем состоянии; отличаются невысокой коррозионной стойкостью и, поэтому, их защищают от коррозии анодированием и лакокрасочными покрытиями; удовлетворительно свариваются точечной и роликовой сваркой и хорошо обрабатываются резанием. Температурный интервал деформирования

в горячем состоянии 350–470 °С. Сплав АК4–1 может быть применен для изготовления деталей двигателя (например, поршни, картеры), деталей колес компрессоров, воздухозаборников, крыльчаток мощных вентиляторов, лопастей и других деталей, работающих при повышенных температурах. Химический состав сплава АК4–1 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава АК4–1

Химические элементы	Al	Mg	Cu	Fe	Si	Ni	Прочее
%	92,49	2,36	2,33	1,04	0,16	1,12	0,50

В данной работе кривые текучести были получены по результатам испытаний образцов сплава АК4–1 размером $\varnothing 10 \times 10$ мм сжатием при температуре от 350 °С до 470 °С. Испытательная машина была оборудована нагревательным устройством. Скорость деформации в процессе испытания поддерживалась постоянной. Для обеспечения нагружения образцов исследуемого материала с постоянной скоростью деформации, были рассчитаны значения перемещения траверсы испытательной машины, соответствующие значению времени, задаваемого контроллером машины. Перемещение траверсы испытательной машины может быть определено следующим образом [3]:

$$S_i = h_0 - \exp(-\dot{\varepsilon}_i \times t) \times h_0, \quad (1)$$

где S_i – перемещение траверсы испытательной машины; $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации; t – время; h_0 – исходная высота образца исследуемого сплава.

Исследовано поведение сплава АК4–1 при его нагружении со скоростью $0,001 \text{ с}^{-1}$, $0,01 \text{ с}^{-1}$ и $0,4 \text{ с}^{-1}$. На рис. 1 представлены индикаторные диаграммы испытаний образцов сплава АК4–1 сжатием; на рис. 2 – кривые текучести, рассчитанные по индикаторным диаграммам, т. е. экспериментальные кривые текучести.

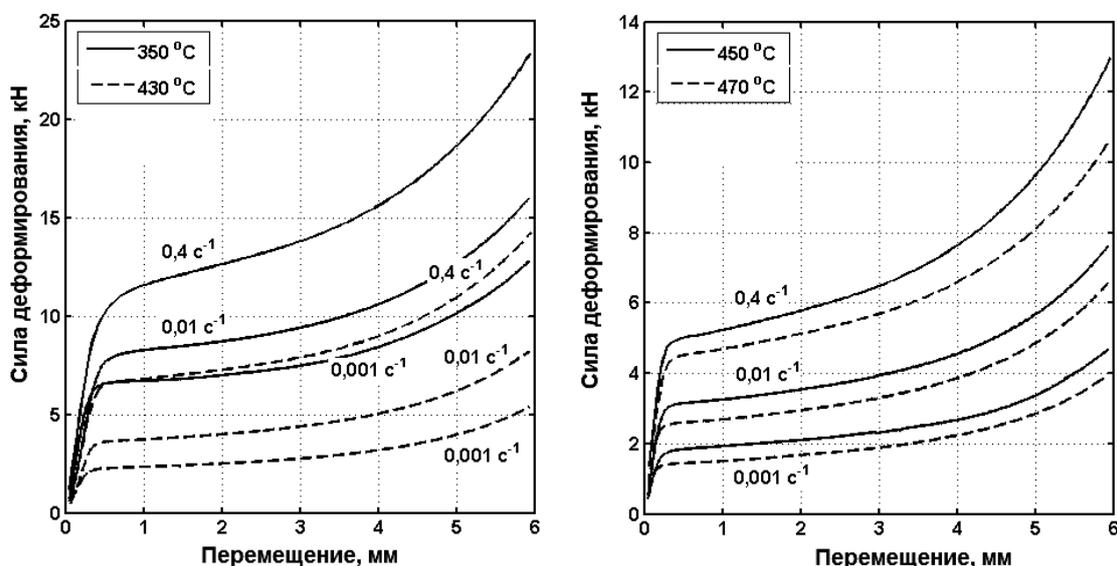


Рис. 1. Индикаторная диаграмма для определения кривых текучести при сжатии

Кривые текучести сплава АК4–1 имеют характерную для горячедеформированных алюминиевых сплавов форму. На полученных кривых текучести наблюдается ярко выраженный максимум величины напряжения текучести и достаточно продолжительный участок установившегося течения материала. Для сплава АК4–1 этот участок начинается при достижении деформации от 0,05 до 0,1 в зависимости от скорости деформации и температуры испытания (рис. 2).

Значение напряжения текучести $\sigma_i^{\text{эксн}}$, вычисленное по индикаторным диаграммам, должно быть скорректировано на величину изменения сопротивления деформации вследствие действия контактного трения. Расчет выполняется с применением уравнения [2]:

$$\sigma_i^f = \frac{\sigma_i^{\text{эксн}}}{A}; \quad A = 1 + \frac{2m}{3\sqrt{3}} \frac{r_0}{h_0} \exp\left(-\frac{3\varepsilon}{2}\right), \quad (2)$$

где σ_i^f – напряжение текучести, соответствующее постоянной температуре испытания T_0 ; m – фактор трения, $0 \leq m \leq 1$; принимаем $m = 0,8$, т. к. осадка образцов выполнялась без смазки; r_0, h_0 – исходные радиус и высота образца исследуемого сплава; ε – накопленная деформация; максимальная накопленная деформация в испытаниях $\varepsilon_{\text{max}} = 0,9$.

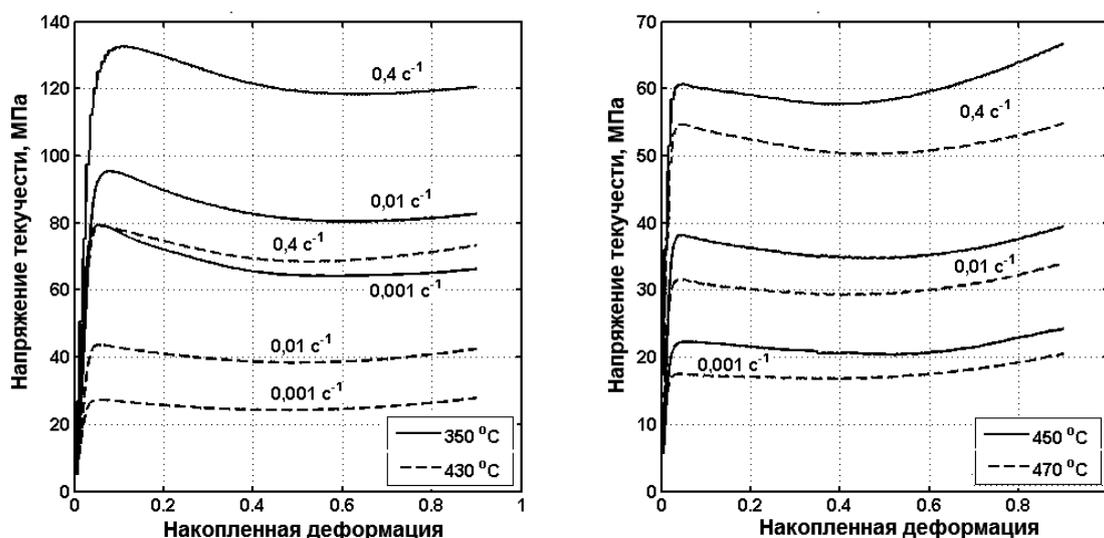


Рис. 2. Экспериментальные кривые текучести

Количественная оценка изменения температуры деформируемого материала, обусловленного тепловым эффектом деформации, может быть выполнена с помощью известного уравнения:

$$\Delta T(\varepsilon) = \frac{\eta}{\rho C_p} \int_0^\varepsilon \sigma_i^f d\varepsilon, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала, $\rho = 2,77 \times 10^3$ кг/м³; C_p – теплоемкость деформируемого материала; для $T = 350^\circ\text{C}$ $C_p = 955,0$ Дж/(кг × К), для $T = 430^\circ\text{C}$ $C_p = 1074,4$ Дж/(кг × К), для $T = 450^\circ\text{C}$ $C_p = 1101,0$ Дж/(кг × К), для $T = 470^\circ\text{C}$ $C_p = 1128,0$ Дж/(кг × К); η – эффективность деформационного нагрева, потерями теплоты в окружающее пространство пренебрегаем, т. е. $\eta = 1$; ε – накопленная деформация.

На рис. 3 представлены результаты расчета действительной температуры нагрева исследуемого материала при испытании.

Расчет «изотермической» кривой текучести выполним, используя для расчета сопротивления деформации закон Курнакова С. Н. [4], который записывается в виде:

$$\sigma_i^{\text{iso}} = \frac{\sigma_i^f}{\exp(\alpha(T_i - T_0))}, \quad (4)$$

где σ_i^{iso} – напряжение текучести при постоянной температуре T_0 ; σ_i^f – напряжение текучести при температуре T_i (экспериментальное значение напряжения текучести);

α – температурный коэффициент; T_i , T_0 – текущая и начальная температура испытания; например, $T_0(\varepsilon = 0) = 350$ °С и $T_i = T_0(\varepsilon = 0) + \Delta T(\varepsilon)$, где $\Delta T(\varepsilon)$ определено по уравнению (3).

Величина температурного коэффициента α (см. уравнение (4)) зависит от температурно-скоростных условий нагружения. В табл. 2 представлены значения коэффициента α в зависимости от скорости деформации.

Таблица 2

Значение коэффициента α			
Скорость деформации, с^{-1}	0,001	0,01	0,4
$\alpha^{max\sigma}$	-0,01115	-0,0085	-0,0055
α_{max}	-0,009	-0,0071	-0,00455
α_{cp}	-0,01008	-0,0078	-0,00503

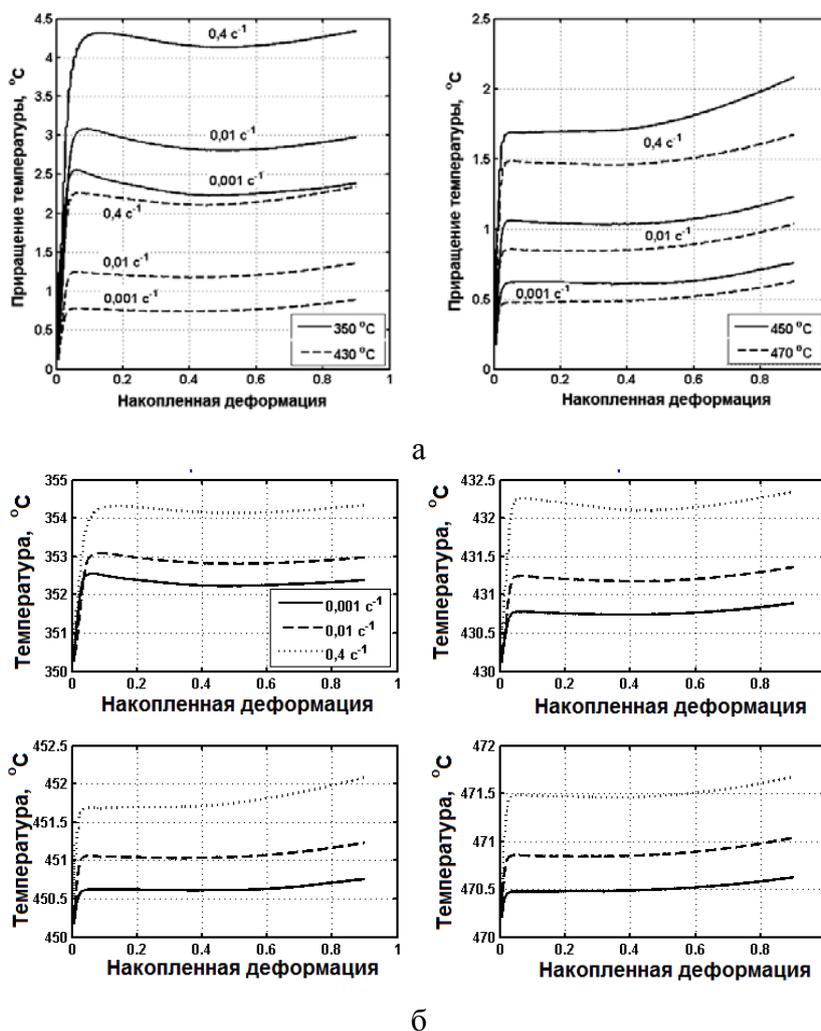


Рис. 3. Тепловой эффект деформации:

а – приращение температуры; б – действительная температура нагрева

Значения коэффициента α определены в предположении, что величина коэффициента слабо изменяется с увеличением значения накопленной деформации. При расчете α учитывали два характеристических значения деформации: значение $\varepsilon^{max\sigma}$, при котором наблюдается максимум на кривой текучести и значение ε_{max} , соответствующее максимальному перемещению траверсы испытательной машины. Далее, из рассмотрения двух экспериментальных кривых текучести, полученных, например, при нагружении образцов исследуемого материала с скоростью $\dot{\varepsilon}_i = 0,001 \text{ с}^{-1}$ при температуре $T_0(\varepsilon = 0) = 350$ °С и $T_i(\varepsilon = 0) = 430$ °С, определяем значение коэффициента α для значения деформации $\varepsilon^{max\sigma}$ и ε_{max} . Рассмотрев для постоянной скорости

деформации все возможные пары значений температур, известные из эксперимента, мы можем определить среднеарифметическое значение коэффициента α (см. табл. 2). При определении значений коэффициента α было использовано уравнение (4), записанное в виде:

$$\sigma_i = \sigma_o \exp(\alpha(T_i - T_o)), \quad (5)$$

где σ_i – напряжение текучести (экспериментальное значение), соответствующее температуре T_i ; σ_o – напряжение текучести (экспериментальное значение), соответствующее температуре T_o ; α – температурный коэффициент; T_i, T_o – температура испытания; например, $T_o (\varepsilon = 0) = 350$ °C и $T_i (\varepsilon = 0) = 430$ °C.

Для расчета «изотермической» кривой текучести использовали среднее арифметическое значение коэффициента α_{cp} .

На рис. 4 представлены «изотермические» кривые текучести, полученные после пересчета кривых текучести, представленных на рис. 2.

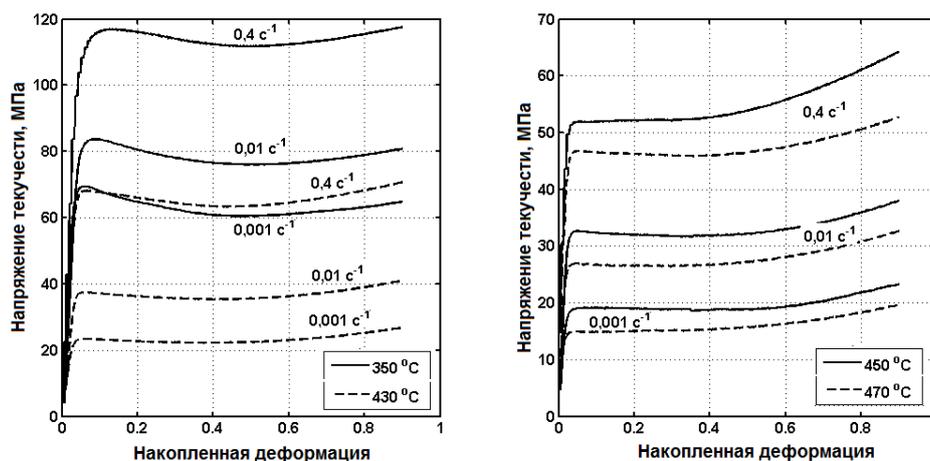


Рис. 4. «Изотермические» кривые текучести сплава АК4–1

Рис. 5 иллюстрирует сравнение экспериментальных кривых текучести с «изотермическими» кривыми текучести. Анализ кривых показывает, что при температуре деформирования от 430 до 470 °C и скорости деформации $\dot{\varepsilon} > 0,01$ с⁻¹ условия деформирования могут быть приняты изотермическими. Это согласуется с результатами работы Селларса М. [5] и работы Чарпентьера П. [1]. При температуре 350 °C и при любой скорости деформации в диапазоне от 0,001 с⁻¹ до 0,4 с⁻¹, а также при температурах 430–470 °C и $\dot{\varepsilon} = 0,4$ с⁻¹ наблюдается отклонение «изотермической» кривой текучести от экспериментальной. Основываясь на наблюдениях, представленных в работах Селларса М. и Чарпентьера П., мы можем предположить, что расхождение между этими кривыми будет увеличиваться с увеличением скорости деформации. Однако данное предположение требует экспериментальной проверки.

ВЫВОДЫ

В статье приведен один из возможных методических подходов к построению «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава АК4–1, деформируемого при повышенных температурах. Полученные кривые (см. рис. 4) могут быть использованы для численного анализа технологических процессов объемной штамповки алюминиевого сплава АК4–1, деформируемого в интервале температур от 350 до 470 °C со скоростью деформации не превышающей 0,4 с⁻¹.

При деформировании алюминиевого сплава АК4–1 с постоянной скоростью деформации $\dot{\varepsilon} > 0,01$ с⁻¹ при температуре 430–470 °C тепловым эффектом пластической деформации можно пренебречь, т. к. условия деформирования близки к изотермическим. Это справедливо только в том случае, если формоизменение образца выполняется в инструменте, нагретом

до начальной температуры деформирования материала, и температура нагрева инструмента поддерживается постоянной в течение всего процесса штамповки. Данное требование соответствует условиям выполнения изотермической горячей объемной штамповки сплава АК4-1.

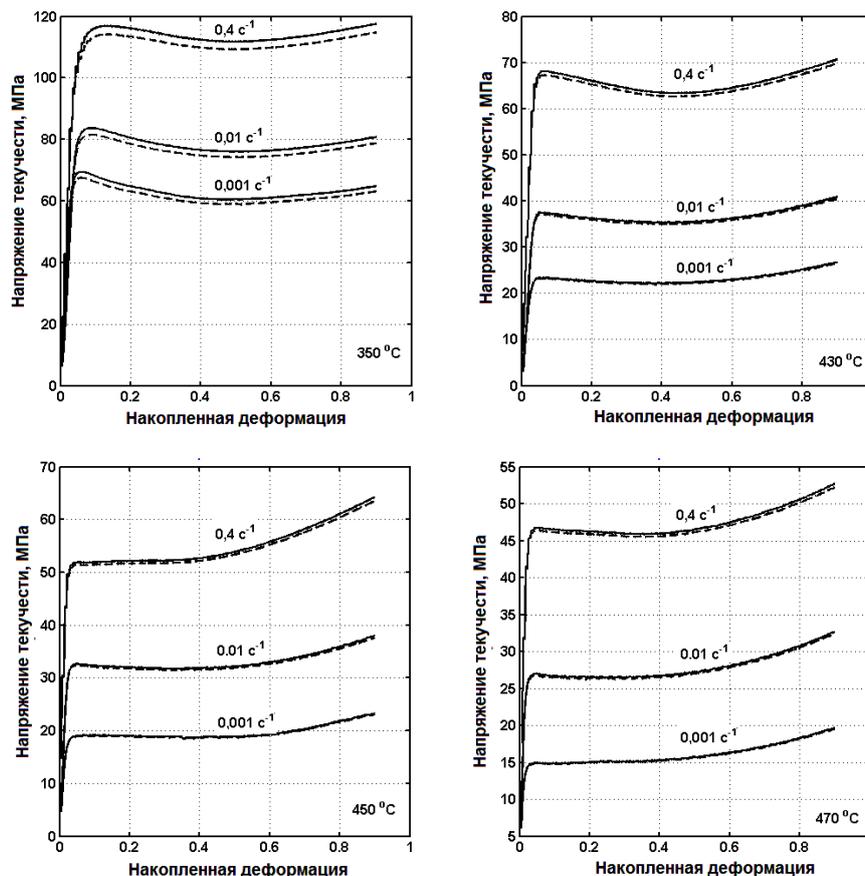


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и «изотермических» кривых текучести (сплошная линия – «изотермическая» кривая текучести; штриховая линия – экспериментальная кривая текучести)

ЛИТЕРАТУРА

1. Szeliga D., Gawad J., Pietrzyk M., *Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming*, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195, 2006, 6778–6798. IF 1.553.
2. *Characterization and Modelling of High Temperature Flow Behavior of Aluminum Alloy 2024* / Charpentier P. L., Stone B. C., Ernst S. C., Thomas J. R // *Met. Trans. A.* – 1986. – № 17. – P. 2227–2237.
3. Петров П. А. Исследование упрочнения алюминиевого сплава АМгб на начальном участке кривой текучести при повышенных температурах / П. А. Петров, В. И. Перфилов; под общ. ред. С. П. Мочалова // *Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. Труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции.* – Новокузнецк : СибГИУ, 2006. – С. 205–212.
4. Губкин С. И. *Пластическая деформация металлов. Том 2.* / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1961. – 416 с.
5. Urcola J. J. *Effect of changing strain rate on stress–strain behaviour during high temperature deformation* / J. J. Urcola, C. M. Sellars // *Acta Metallurgica.* – 1987. – № 35 (11). – P. 2637–2647.

Петров П. А. – канд. техн. наук, доц. МГТУ «МАМИ».

МГТУ «МАМИ» – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет «МАМИ», г. Москва.

E-mail: petrov_p@mail.ru